卒業研究報告

題目

ESD 破壊試験装置の評価と改良

報　告　者

学籍番号:1100201

氏名:倉内真吾

指　導　教　員

真田　克

平成22年2月19日

高知工科大学　電子・光システム工学科

目次

第１章　はじめに 3
1.1　研究の背景 3
1.2　研究の目的 3
第２章　ESD について 4
2.1　ESD とは 4
2.2　ESD 破壊とは 4
2.3　ESD 破壊モデル 4
第３章　実験装置 7
3.1　ESD 破壊試験装置 7
3.2　ESD 破壊試験装置の構造 8
3.3　ESD 破壊試験装置の操作手順 10
第４章　故障解析に使用した装置 12
4.1　簡易エミッション顕微鏡 12
4.2　半導体パラメータアナライザ 13
第５章　使用した IC,破壊モデル 14
5.1　使用 IC 14
5.2　破壊モデル 15
第６章　実験手順 16
6.1　ESD 破壊試験装置を使用した LSI の破壊 16
6.2　故障確認 16
6.3　パッケージの開封 17
6.4　ESD 故障箇所の確認 18
6.5　ESD 破壊試験装置の印加パルスの観測 19
第７章　実験結果 21
7.1　ESD 破壊サンプル１ 21
7.2　ESD 破壊サンプル２ 24
7.3　ESD 破壊サンプル３ 28

7.4　ESD 破壊サンプル４ 31
7.5　ESD 破壊サンプル５ 33
7.6　ESD 破壊サンプル６ 35
7.7　ESD 破壊サンプル７ 38
7.8　ESD 破壊サンプル８ 40
7.9　ESD 破壊試験装置の印加パルス・電圧測定 43

第８章　考察・結論 51
考察..51
結論..52
謝辞..52
参考文献..52

第 1 章　はじめに

1.1　研究の背景

半導体である LSI や IC といったデバイスには通常静電気等によって発生する過電圧や過電流によって回路が破壊されるのを防ぐために保護回路が設けられている。しかし、近年の微細化や高集積化にともなった静電気耐性の低下により市場故障の約 70%が EOS、ESD 破壊であることが報告されている。ESD 破壊の発生数は増加の傾向にある。

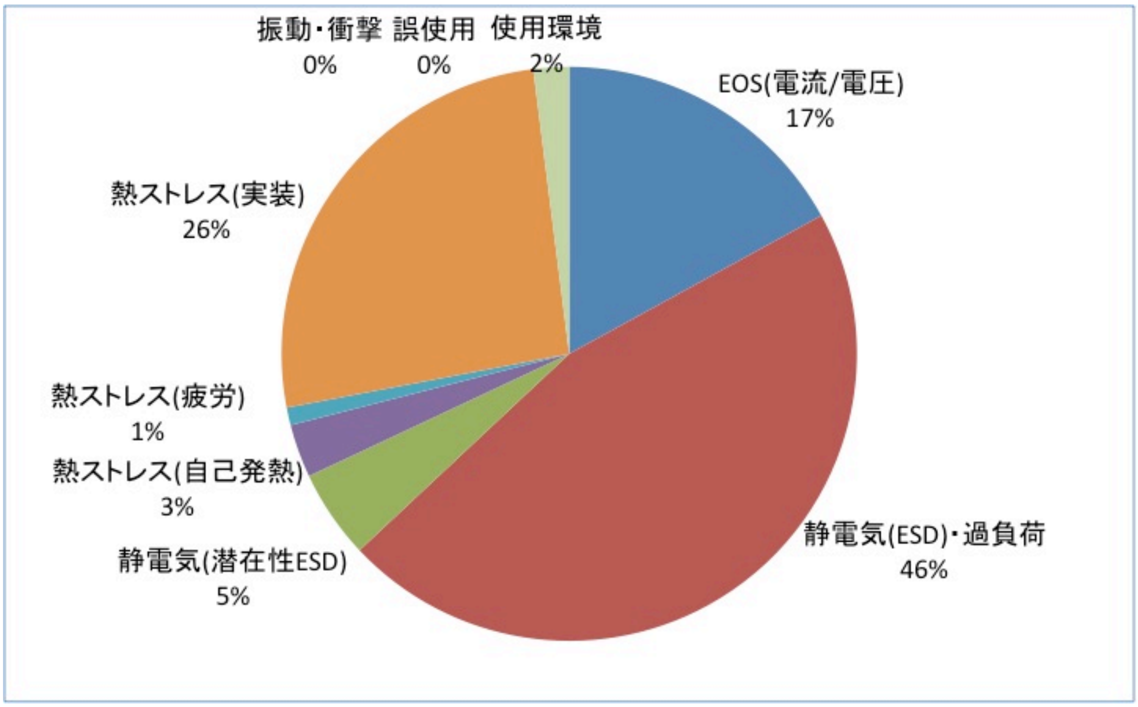


図 1.1.1：外的要因故障の内訳[1]

1.2　研究の目的

平成 20 年度に卒業された山崎規雄氏の制作された ESD 破壊試験装置を使用した実験をおこなうことで装置の現状の課題点を探り、課題点の発見・改善をおこなうことで装置の破壊精度向上を図る。とともに、LSI の ESD 破壊箇所の検出・確認をおこなうことで ESD 破壊についての理解を深める。

第２章　ESD について

この章では ESD 並びに ESD 破壊について述べる。

2.1　ESD とは

ESD(Electro-Static-Discharge)とは静電気放電のことで、頭文字をとった名称である。

Electro : 電子

Static : 静電気

Discharge : 放電

2.2　ESD 破壊とは

ESD が要因となって発生する破壊現象を ESD 破壊と呼ぶ。ESD 破壊には、帯電物からデバイス端子への ESD によって発生する破壊現象である。及び、デバイス本体が帯電し、静電誘導した端子から外部導体への ESD によって発生する破壊現象がある。デバイス内部の破壊によって故障や誤動作を発生させる。

2.3　ESD 破壊モデル

ESD 破壊の発生を要因別にモデル化したもので、ESD 破壊をシミュレートするのに用いる。ESD 破壊モデルの基本構造は直列接続した抵抗(R)とコンデンサ(C)で構成されており、人体帯電モデル、マシン帯電モデル、デバイス帯電モデルの３種類のモデルについて以下にまとめる。

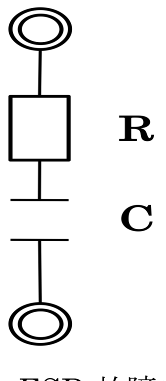
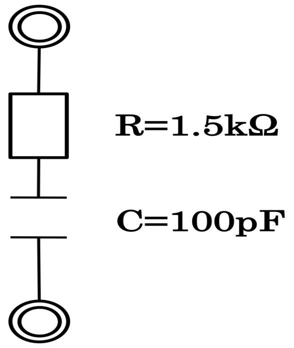


図 2.3.1 : ESD 故障モデルの基本構造

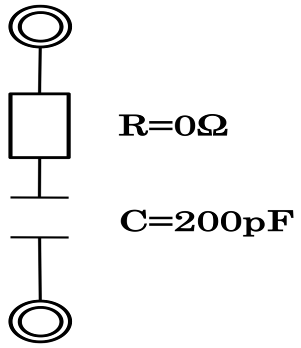
(1)人体帯電モデル

人体帯電モデル(HBM：Human Body Model)は帯電した人がデバイス端子に触れることでデバイスが帯電し、デバイスが接地されることで ESD 破壊が発生する現象のモデルである。このモデルを構成している抵抗、コンデンサの値は人体の皮膚抵抗及び静電容量に従って設定されている。また、このモデルを使用した際の印加電圧は 2kV~5kV と設定されている。



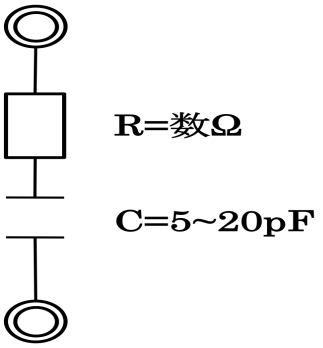
(2)マシンモデル

マシンモデル(MM : Machine Model)は帯電した装置または金属がデバイス端子に触れることによってデバイスが帯電し、デバイスが接地されることで ESD 破壊が発生する現象のモデルである。このモデルを構成しているのはコンデンサのみであり、抵抗は放電が金属同士のため 0Ω としている。このモデルを使用した際の印加電圧は 300V~500V と設定されている。



(3)デバイス帯電モデル

デバイス帯電モデル(CDM：Charged Device Model)は摩擦等によってデバイス本体が帯電し、デバイスが接地されることで ESD 破壊が発生する現象のモデルである。 また、このモデルを使用した際の印加電圧は 1kV~10kV と設定されている。



第３章　実験装置

この章では本研究で使用した ESD 破壊試験装置の概要について述べる。

3.1　ESD 破壊試験装置

以下の写真は本研究で使用した ESD 破壊試験装置である。この装置の制作者は平成 20 年度に卒業された山崎規雄氏である。

図 3.1.1：ESD 破壊試験装置の外観

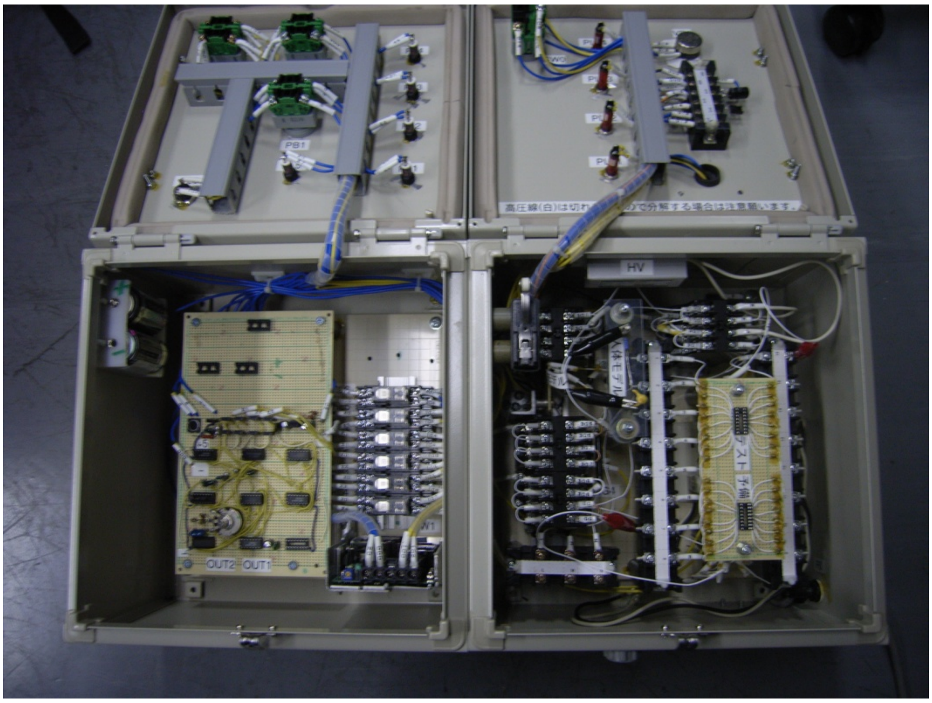


図 3.1.2：ESD 破壊試験装置の内部

この装置の印加電圧はMAX3000Vとなっており、右側ボックス内部にあるLSI挿入ソケットにLSIをセットし、装置を動作させることでESD破壊を再現することができる。

3.2 ESD破壊試験装置の構造

ESD破壊試験装置は以下の回路で構成される。制御回路(図3.2.1)では4つの回路（50ms 発信回路、動作回路、300ms 停止回路、スタート同期回路）を組み合わせた出力をトランジスタに通して信号伝搬経路へ入力する。

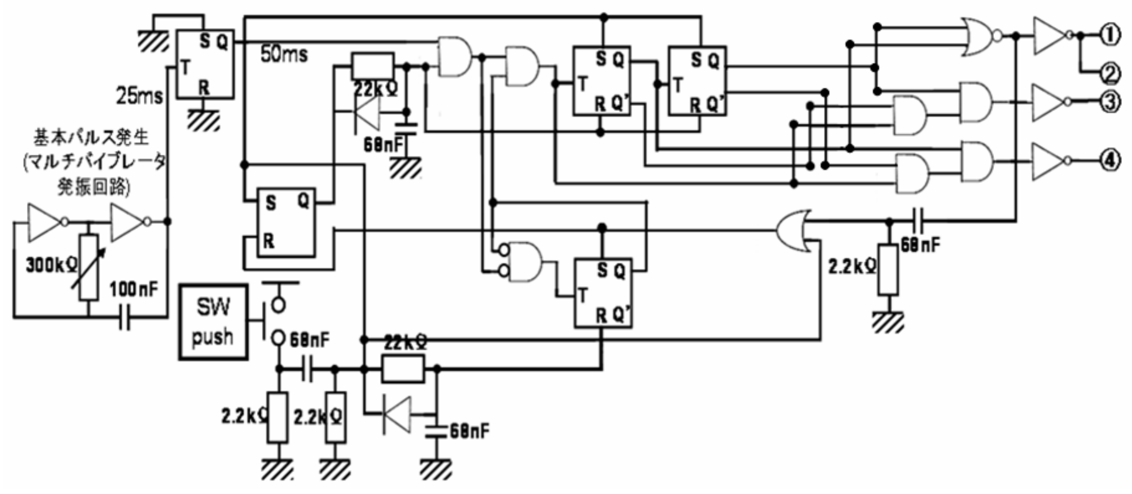


図 3.2.1：制御回路

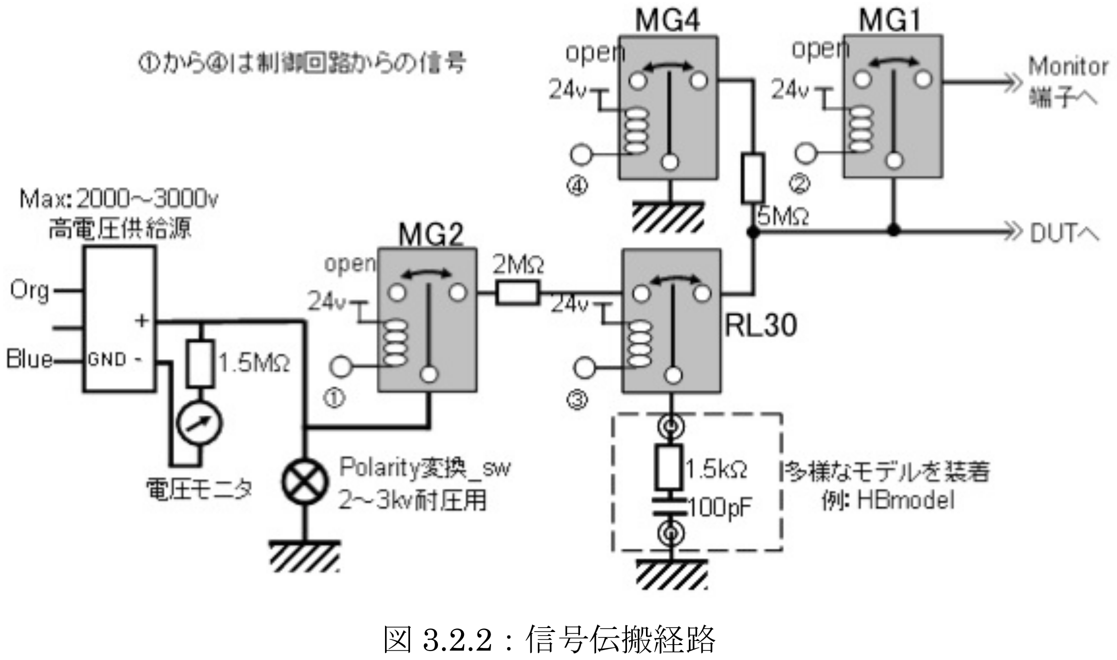


図 3.2.2：信号伝搬経路

信号伝搬経路(図 3.2.2)は制御回路(図 3.2.1)より出力される①～④の信号によってそれぞれ対応したリレー①～④の開閉をおこなうことで MAX3000V 電圧を出力する。また、図 3.2.3 は制御回路より出力される①～④の信号をまとめたものである。図 3.2.2 の図中にあるリレーはこの信号の ON/OFF のタイミングによって動作をおこなう。

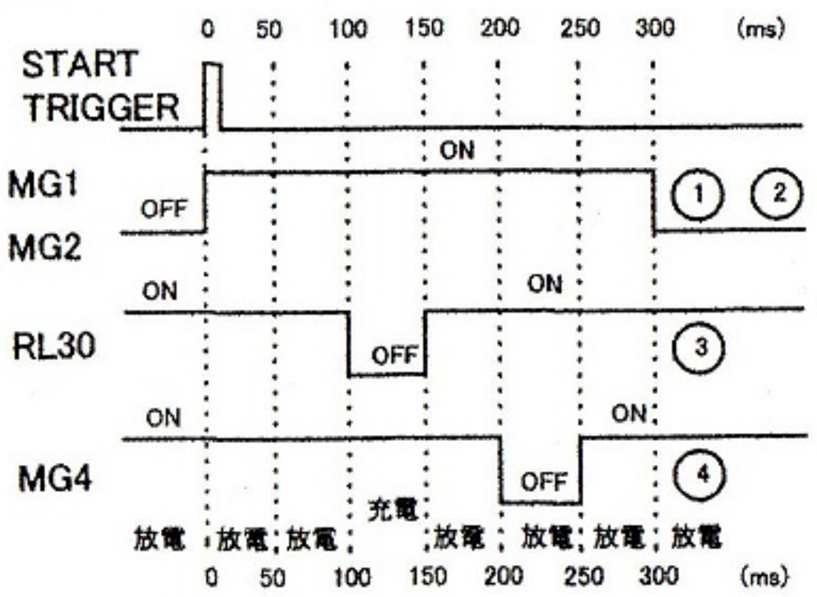


図 3.2.3 : リレーの動作タイミング

3.3　ESD 破壊試験装置の操作手順

１．電源スイッチ…切 テスト/待機スイッチ…待機 になっているか確認。(図3. 3. 1)

２．コンセントに挿入後電源スイッチを(入)にする。

３．電源ランプ、放電ランプ、グラウンドランプが点灯し、50msOSC ランプの点滅を確認する。(図3. 3. 1)

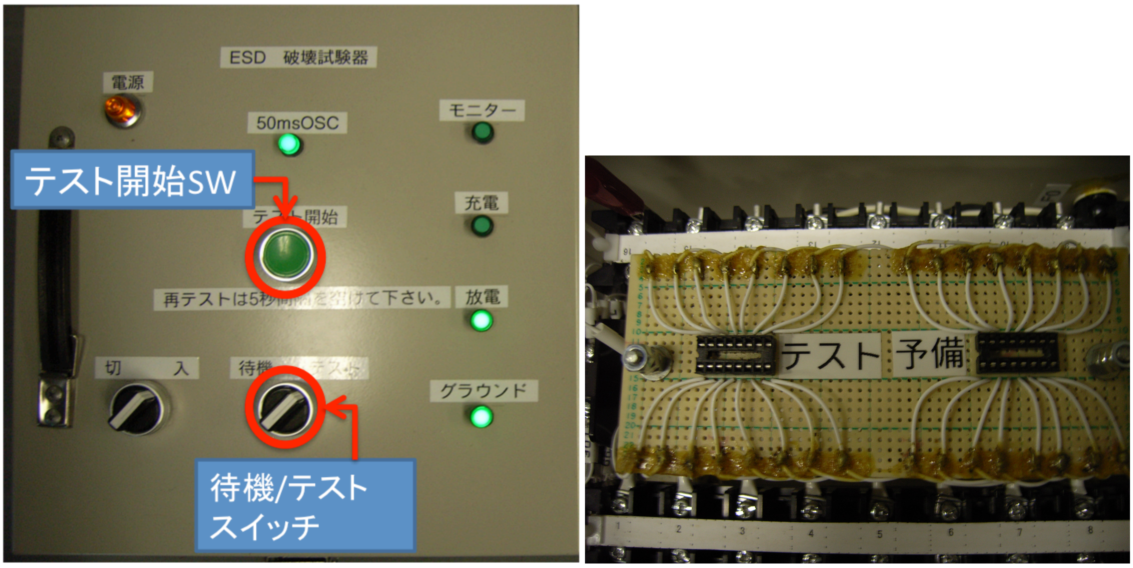


図3.3.1：ESD破壊試験装置操作パネル(左側)，LSI挿入ソケット

４．テスト開始スイッチをONにする(再テストの場合は5秒間隔をあける)。

５．モニター、充電、放電、グラウンドランプの点滅・点灯を確認する。

６．以上を確認後、一度電源を切りLSI挿入ソケット(図3. 3. 1)のテスト側に破壊するLSIを挿入。

７．1~5 の手順を再度実施。

８．待機/テストスイッチ(図 3.3.1)をテスト側にし、極性変更スイッチ(図 3.3.2)で正極性、逆極性を決定する。

９．MAX15V 入力電圧の表示より MAX3000V 電圧調整で目的のテスト電圧に決定する。(図 3.3.2)

図 3.3.2：ESD 破壊試験装置操作パネル(右側)

１０．テスト開始スイッチを ON する。(図 3.3.1)

１１．ランプの点滅、点灯が確認できれば破壊試験完了。(図 3.3.2)

１２．電源を切り、安全のためコンセントを抜いて 30 秒後に LSI を抜き取る

１３．再テストする場合は(1)~(12)の手順で再度実施

第４章　故障解析に使用した装置

この章ではLSIのESD破壊箇所特定のために使用した簡易エミッション顕微鏡と半導体パラメータアナライザについて述べる。

4.1　簡易エミッション顕微鏡

図 4.1.1 の装置を使用し、発光現象の観測をおこなった。この装置に設置されている CCD カメラを使用して LSI の発光を観察する。LSI の発光は微弱なため光を遮断した空間で撮影をおこなうことから、通常時の写真と簡易エミッション顕微鏡で撮影した写真を合成することで発光箇所の特定をおこなう。発光はゲート酸化膜や PN 接合などにリーク電流が流れることで観察できるため、故障箇所の特定に使用することができる。

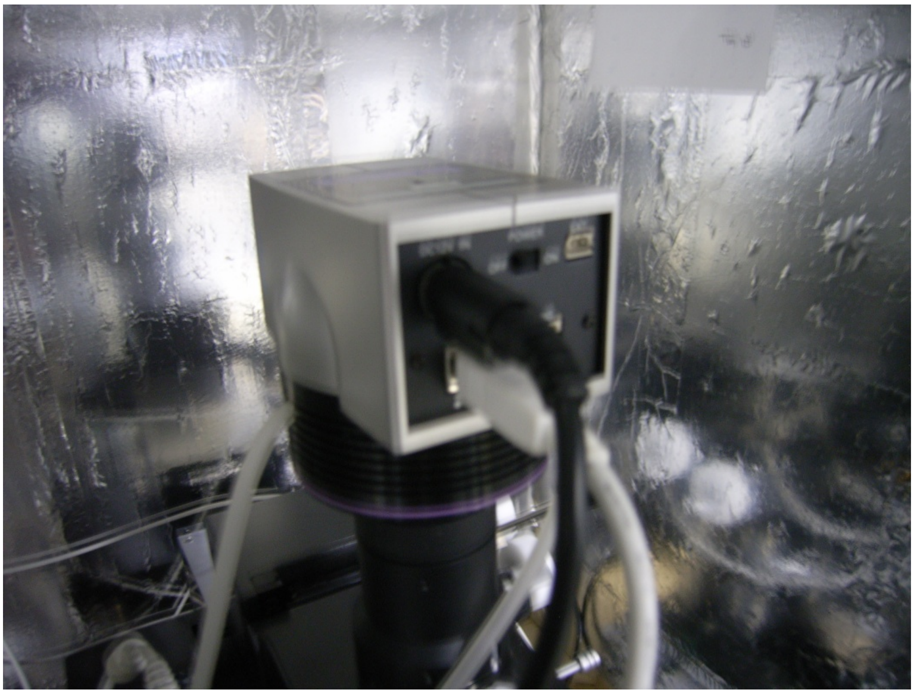


図 4.1.1　簡易エミッション顕微鏡

4.2　半導体パラメータアナライザ

図 4.2.1 の装置を使用し、電源電流(IDD)の測定をおこなった。この装置は搭載している SUM(ソース／モニタ・ユニット)から電圧・電流の供給及び測定をおこなう装置である。また、Visual BASIC を使用して作成された自動測定用プログラムを使用して PC から装置を制御する。

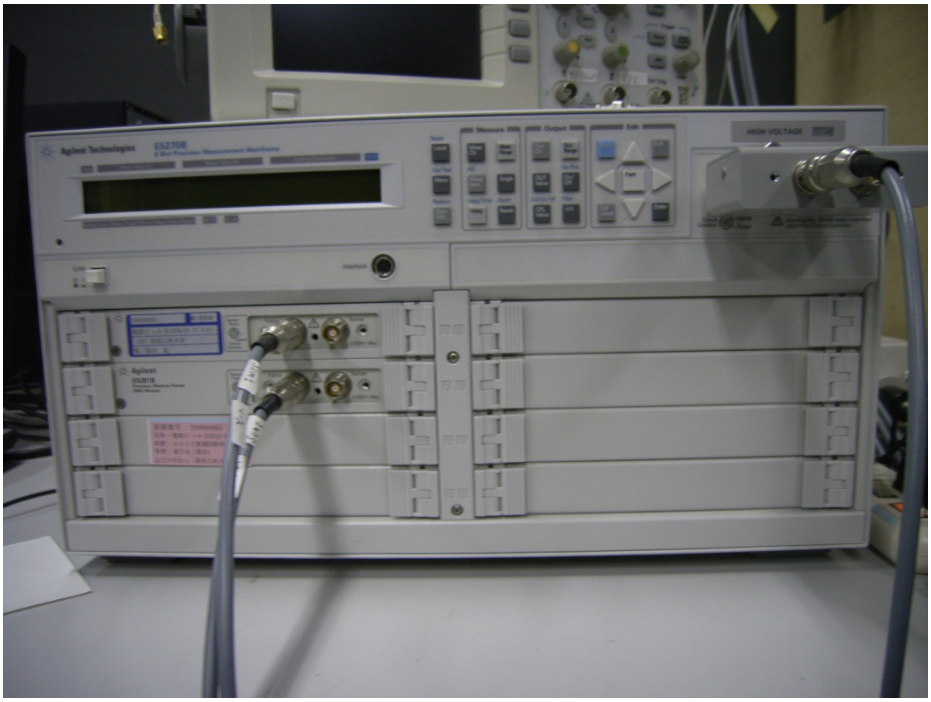


図 4.2.1　半導体パラメータアナライザ(Agilent 社製：E5270B)

測定時には、電源(VDD,GND)に SUM1,GND を使用し、入力に SUM2 を使用した。

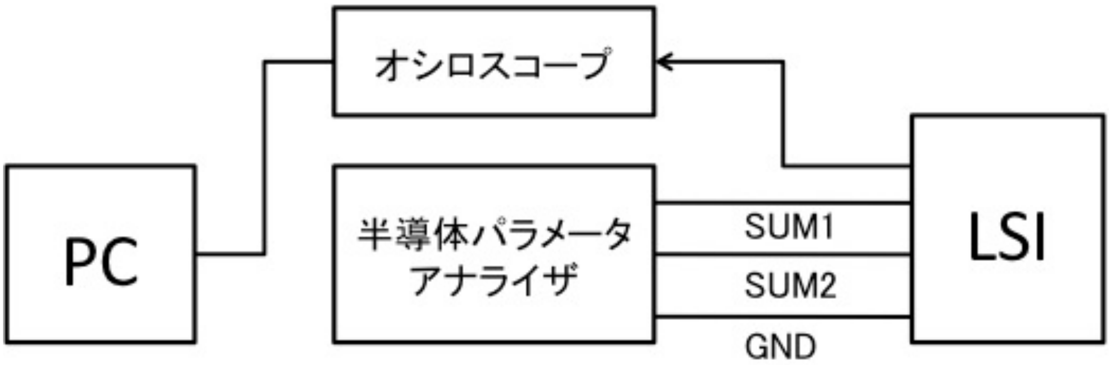


図 4.2.2　測定時の装置構成

第５章　使用した IC,破壊モデル

この章では本研究で使用した IC ならびに ESD 破壊モデルについて述べる。

5.1　使用 IC

本研究では IC(TC4071BP)を使用した。IC には 4 つの OR 回路が入っており、図 5.1.2 上の番号は図 5.1.1 のピン番号に対応している。また、今回の実験ではこの IC の 14–7 ピン間、14–2 ピン間及び 1–7 ピン間に電圧を印加することで ESD 破壊のシミュレーションをおこなった。

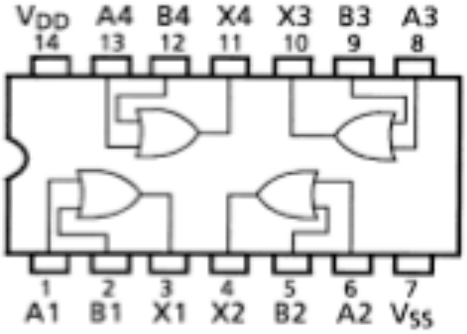


図 5.1.1：ピン接続図

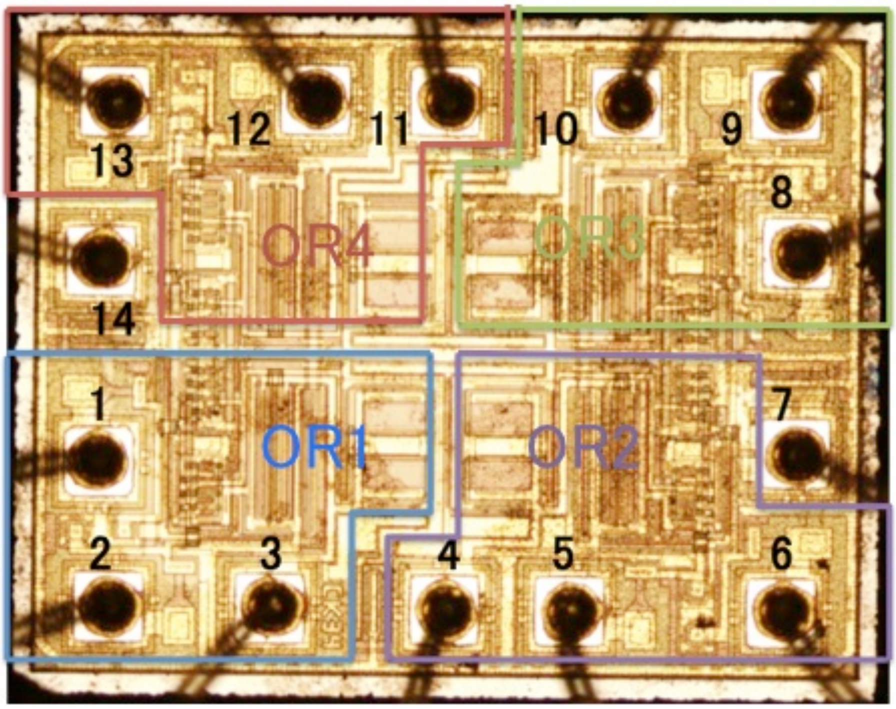


図 5.1.2：IC 内部写真

図 5.1.2 の OR1 部分にあたる箇所のレイアウトパターンが図 5.1.3 である。赤線は VDD を青線は GND を表している。

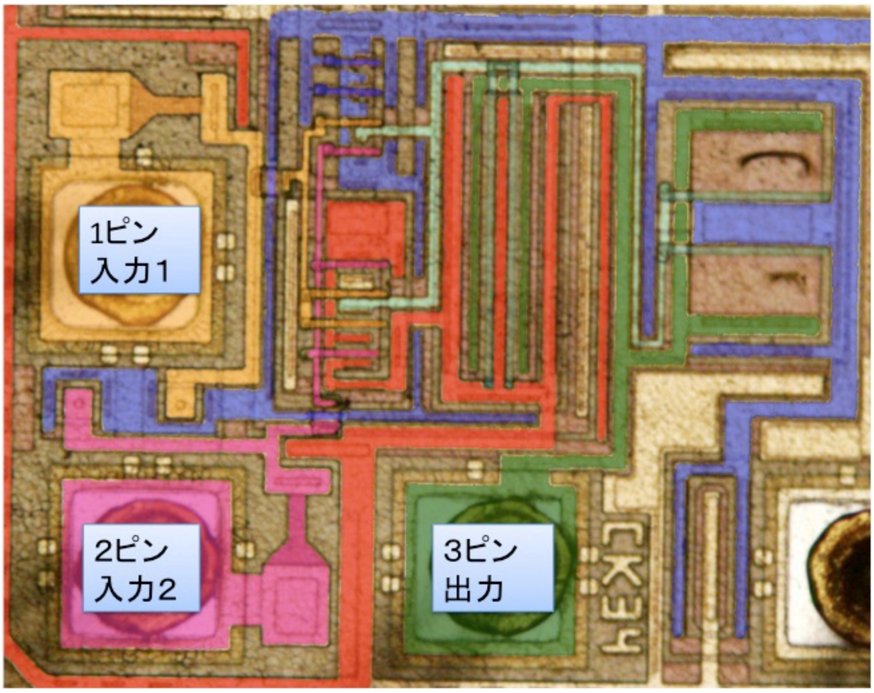


図 5.1.3：OR 回路レイアウト(写真：ESD 破壊サンプル１)

5.2　破壊モデル

図 5.2.1 は本研究で使用した人体帯電モデルである。人体帯電モデルを構成している抵抗、コンデンサの値は人体の皮膚抵抗及び静電容量に従って設定されている。また、印加電圧は 3000V となるため高電圧に耐える抵抗とコンデンサで構成されている。

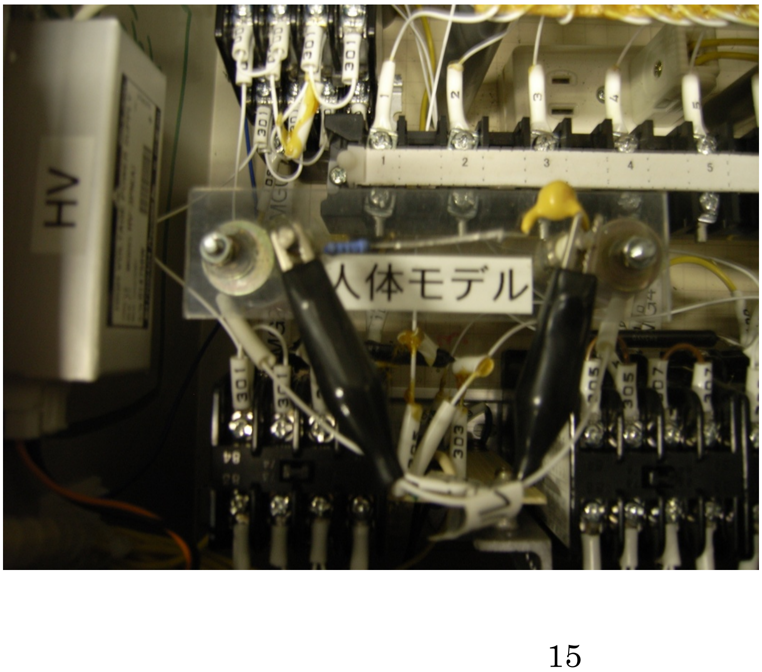


図 5.2.1：人体帯電モデル

第６章　実験手順

この章では本研究の実験手順について述べる。次章の対応としてESD破壊サンプルは6.1~6.4節、ESD破壊試験装置は6.5節に実験手順を示す。

6.1　ESD破壊試験装置を使用したLSIの破壊

ボックス右側内部にあるLSI挿入ソケットのテスト側に試験LSIをセットする。図 6.1.1 の外側にみられる番号を書いてある部分にはソケットのピン番号と対応した出力3000V電圧の接続箇所があり(図6.1.1では7ピンと16ピンに接続してある)、接続箇所を変更することで電圧を印加した際の電流経路の変更をおこなうことができる。また、今回の実験ではVDD→GND, VDD→IN(２ピン), IN(１ピン)→GNDの３パターンの電流経路を使用した。

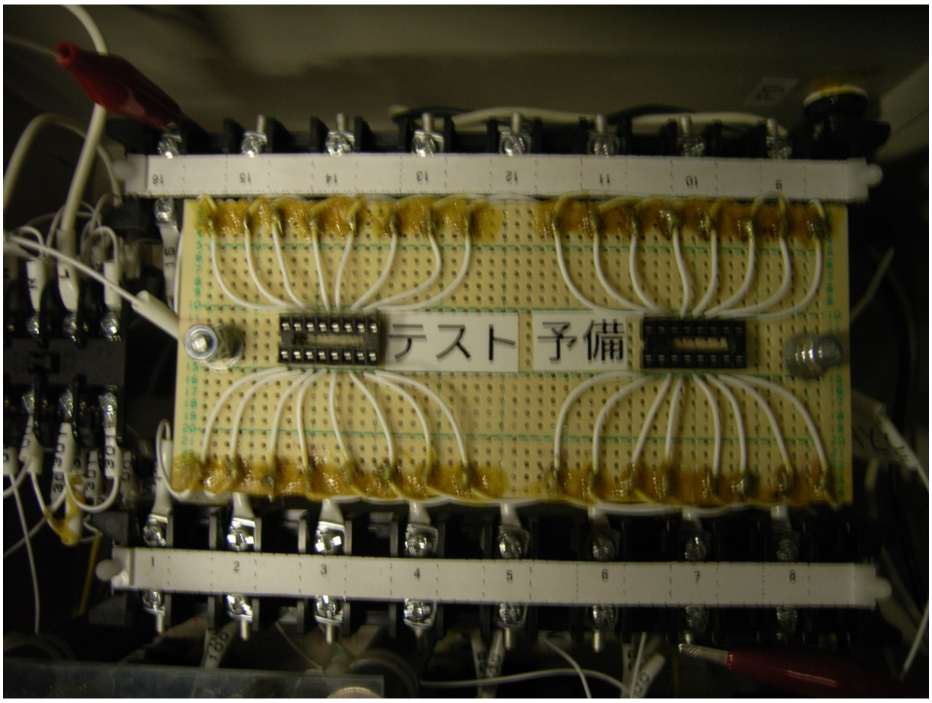


図 6.1.1 : LSI挿入時

6.2　故障確認

半導体パラメータアナライザを使用し、正常品と故障品の入力がそれぞれ00→01、00→10、01→11、10→11 に変化した場合の電源電流の測定をおこない、測定結果を比較することで故障の確認をおこなう。

6.3　パッケージの開封

故障確認後、故障箇所の確認をおこなうためサンプル IC のパッケージ開封をおこなう。以下に開封の手順を説明する。

薬品エッチング前の準備

・ 薬品エッチングの時間を短縮するために LSI の中央部分をドリルで削る。(チップ部分を傷つけないように削る深さを注意する。)
・ ドリルで削った部分以外への薬品の浸食を防ぐためにアルミテープで LSI を覆う。

図 6.3.1：アルミテープマスキング

図 6.3.2：発煙硝酸

薬品エッチング

・ドラフターの電源を ON にする。
・ファンの稼動を確認する。
・ホットプレートの電源を入れ、温度を 150℃に設定する。
・薬品の取り扱いはドラフター内でおこない手袋を装着する。
・発煙硝酸をビーカーに適量注ぐ。
・ビーカーに移した発煙硝酸に LSI を漬け込み、ホットプレートに載せる。
・反応を見ながらパッケージが溶けるのを待つ。
・温度が上がることで反応が起こりやすくなるが、温度が上がりすぎると危険なため、温度が上がり過ぎないように注意する。(温度が上がりすぎると大量に煙が発生する。)
・パッケージが溶け、内部のチップが綺麗に確認できるようになると、アセトン洗浄をおこなう。

薬品エッチンング後の洗浄
・アセトンが適量入ったビーカーに LSI を漬け込み、超音波洗浄気で洗浄をおこなう。
・洗浄中はアセトンの汚れ具合によってアセトンの交換を何度かおこなう。
・LSI を漬け込んだアセトンに汚れが沈殿しなくなると洗浄終了。

図 6.3.3：アセトン洗浄

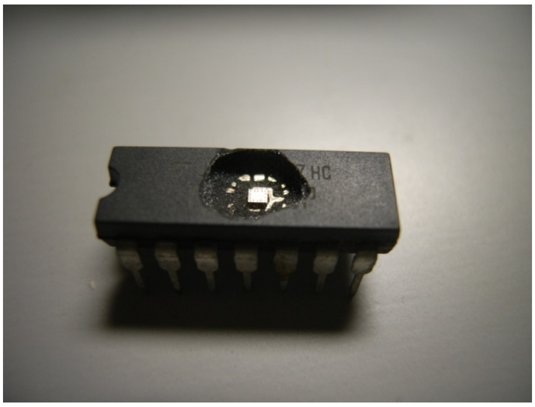


図 6.3.3：開封後の LSI

6.4 ESD 故障箇所の確認

パッケージ開封後は、光学顕微鏡と簡易エミッション顕微鏡を使用して故障箇所の確認をおこなう。

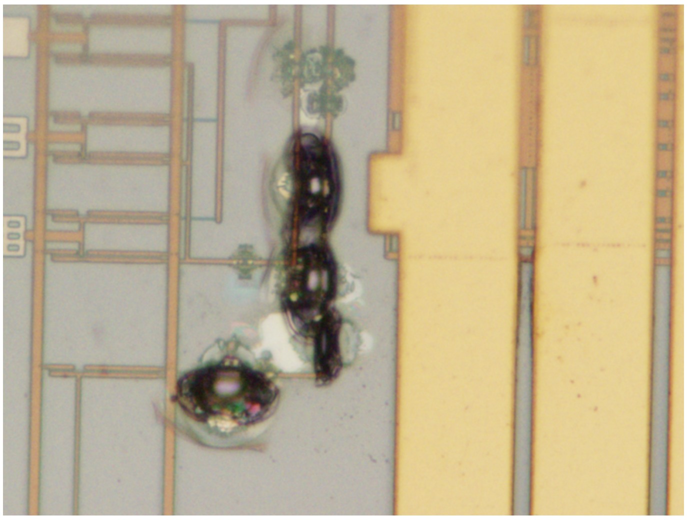


図 6.4.1：光学顕微鏡を使用した検出事例

光学顕微鏡で故障箇所の確認ができない場合は、簡易エミッション顕微鏡を使用した発光箇所の確認をすることで故障箇所の特定をおこなう。

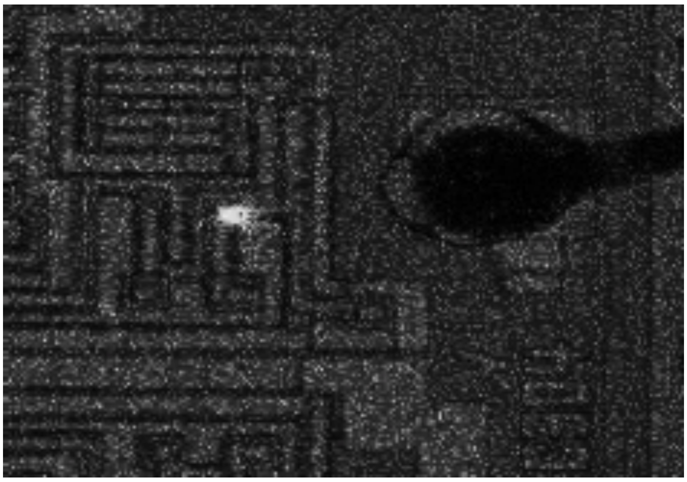


図 6.4.2：簡易エミッション顕微鏡を使用した検出事例

6.5　ESD 破壊試験装置の印加パルスの観測

ESD 破壊試験装置から LSI に印加されるパルス波形の観測および出力される電圧値の測定をおこなうことで、ESD 破壊試験装置の現状を知る。

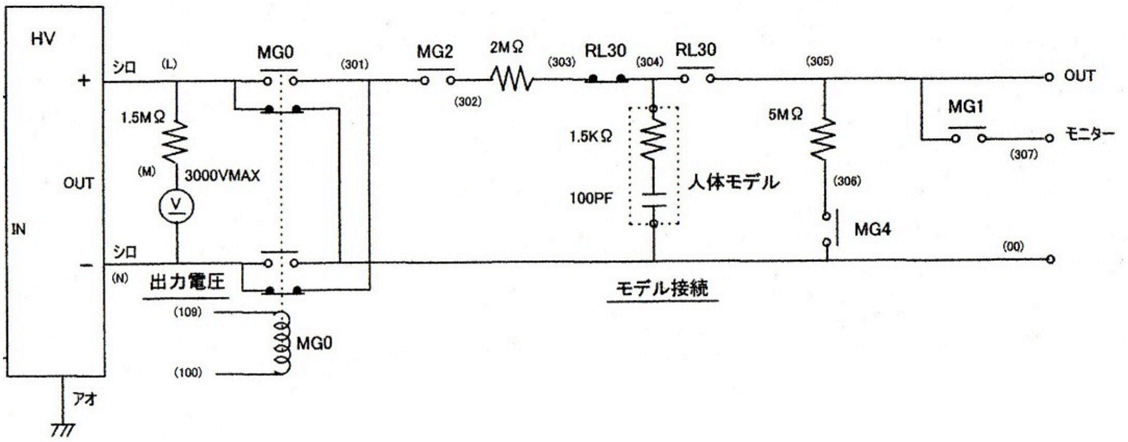
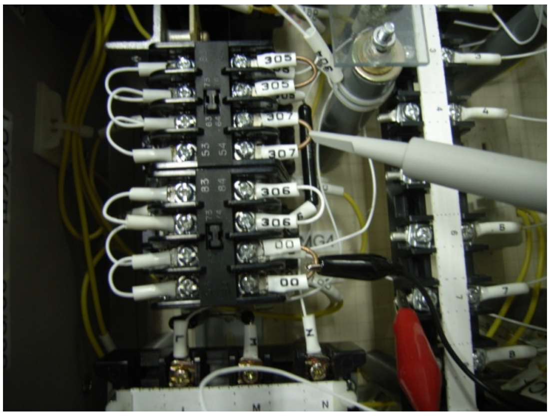


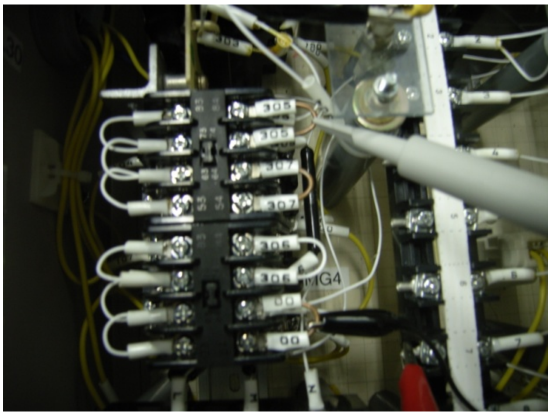
図 6.5.1：高電圧 3000V 回路

図 3.2.2 の信号伝搬経路図に極性変更をおこなうためのリレー(MG0)を追加したものが図 6.5.1 である。この回路図における 4 カ所の電圧をそれぞれオシロスコープで測定し、ESD 破壊試験装置の仕様と測定値の比較をおこなう。

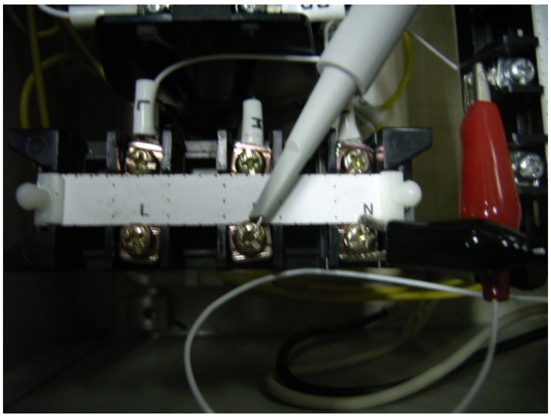
図 6.5.1 における測定箇所



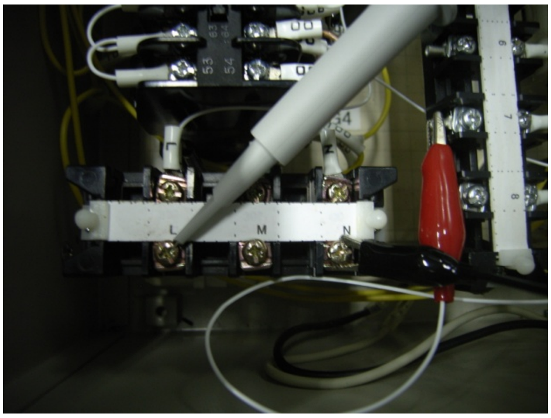
モニター端子



OUT 端子：高電圧回路の出力電圧



M/N 端子



L/N 端子：高電圧回路の入力電圧

第 7 章　実験結果

この章では第 6 章で前述した実験手順に従っておこなった実験結果について述べる。

7.1　ESD 破壊サンプル 1

ESD 破壊サンプル 1 で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル 1	VDD→GND	1

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

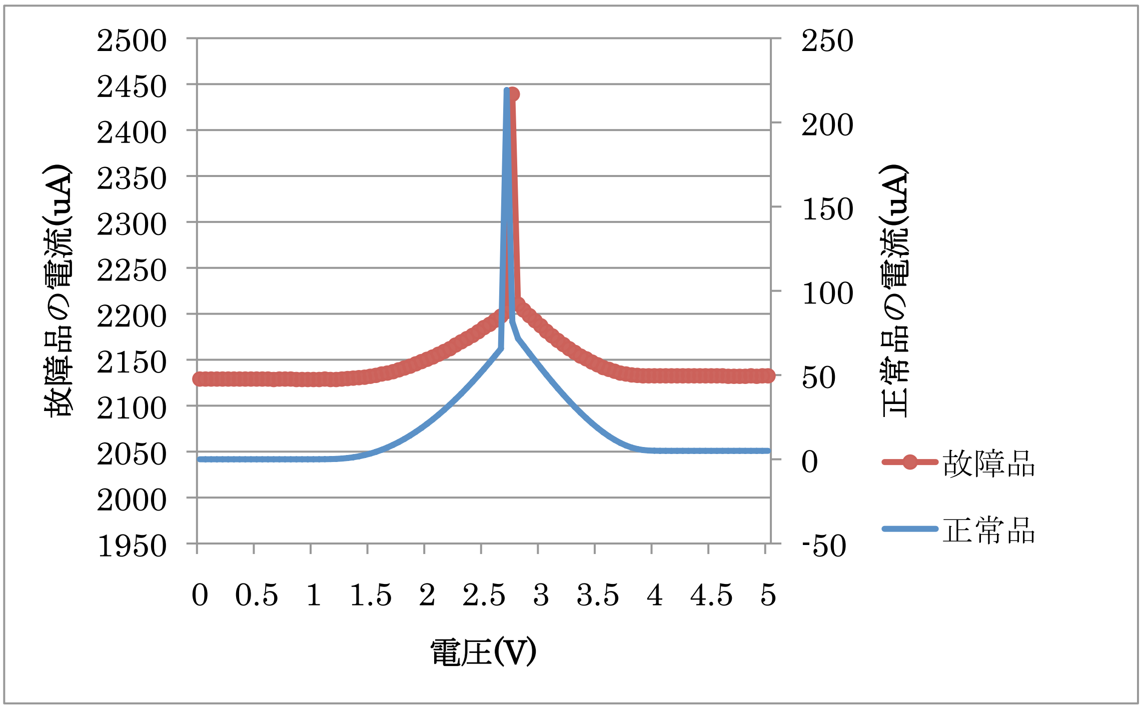


図 7.1.1：入力 00→10

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、図の〇印の箇所に ESD 破壊を確認することができた。

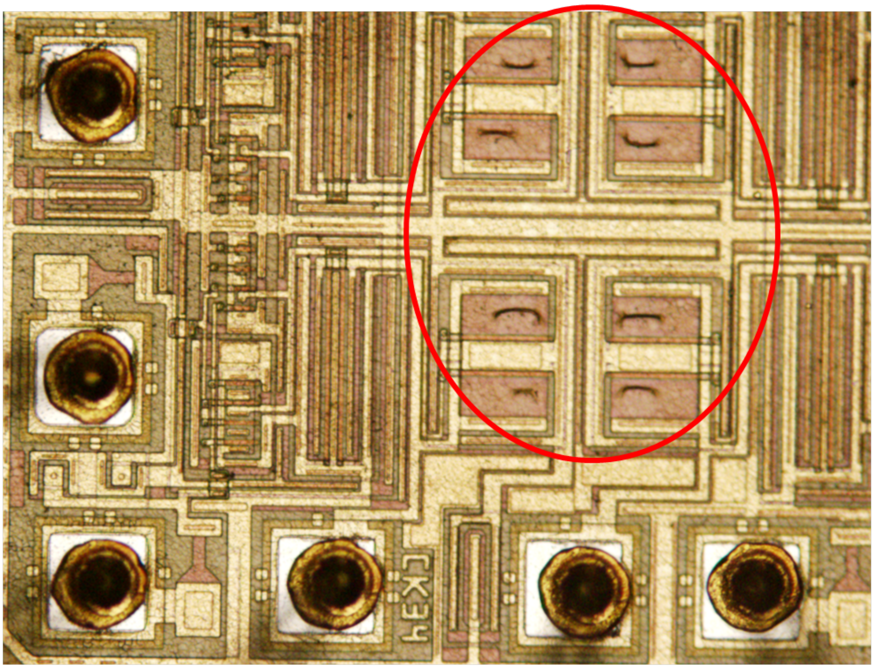


図 7.1.2：光学顕微鏡での故障箇所の特定

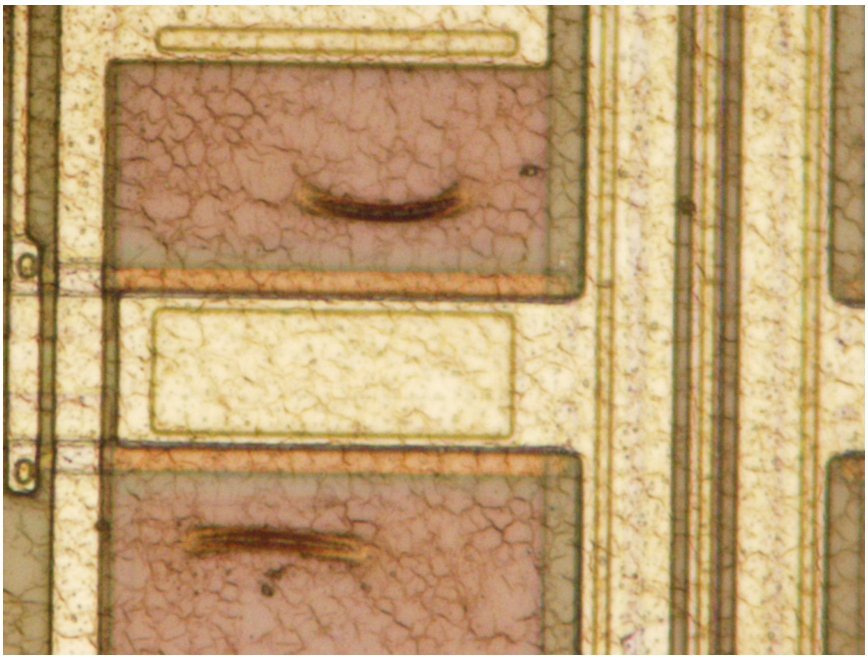


図 7.1.3：拡大した故障箇所

故障の形状が隆起したようになっていることから断面解析をおこなうことにした。そこで業者にサンプルの切断を依頼したのだが、切断箇所が悪く故障箇所そのものも切断されていたため断面解析をおこなうことはできなかった。

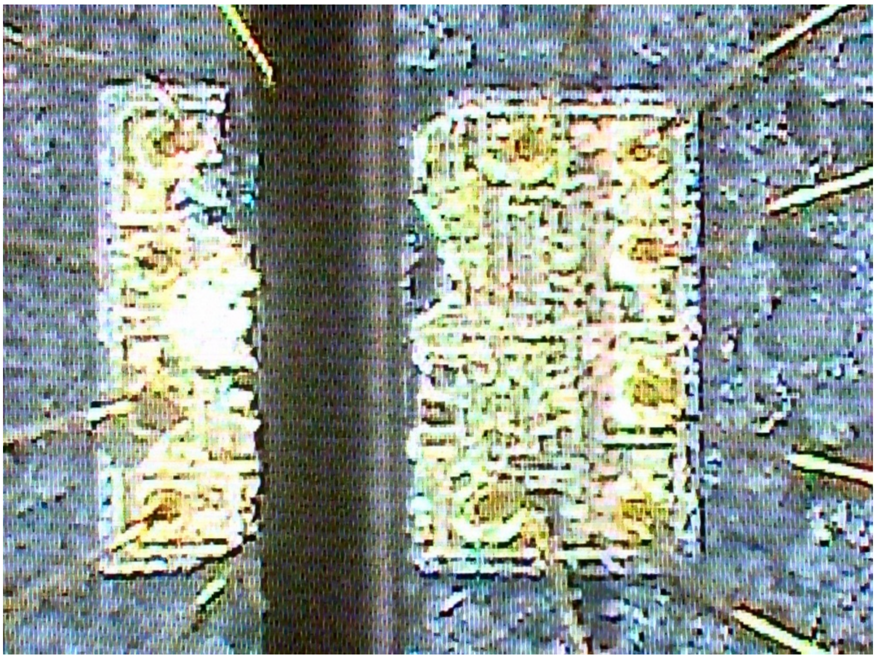


図 7.1.4：サンプルの切断写真

このサンプルは今回実験をおこなった他のサンプルの中では唯一 IC 内の４つの回路に ESD 破壊を確認することができた。電流経路が VDD−GND 間であることから両配線が４つの回路全てにつながっているため発生した故障だと考えられる。また、この故障はインバーターの Pch ソースの VDD からドレインをとおして Nch ソースの GND に大電流が流れたことによって発生した故障ではないかと考える。また、このサンプルの切断依頼を出したのが簡易エミッション顕微鏡を使用した発光観測前だったためこのサンプルの発光は確認出来ていない。

7.2　ESD 破壊サンプル２

ESD 破壊サンプル２で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル２	VDD→GND	3

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

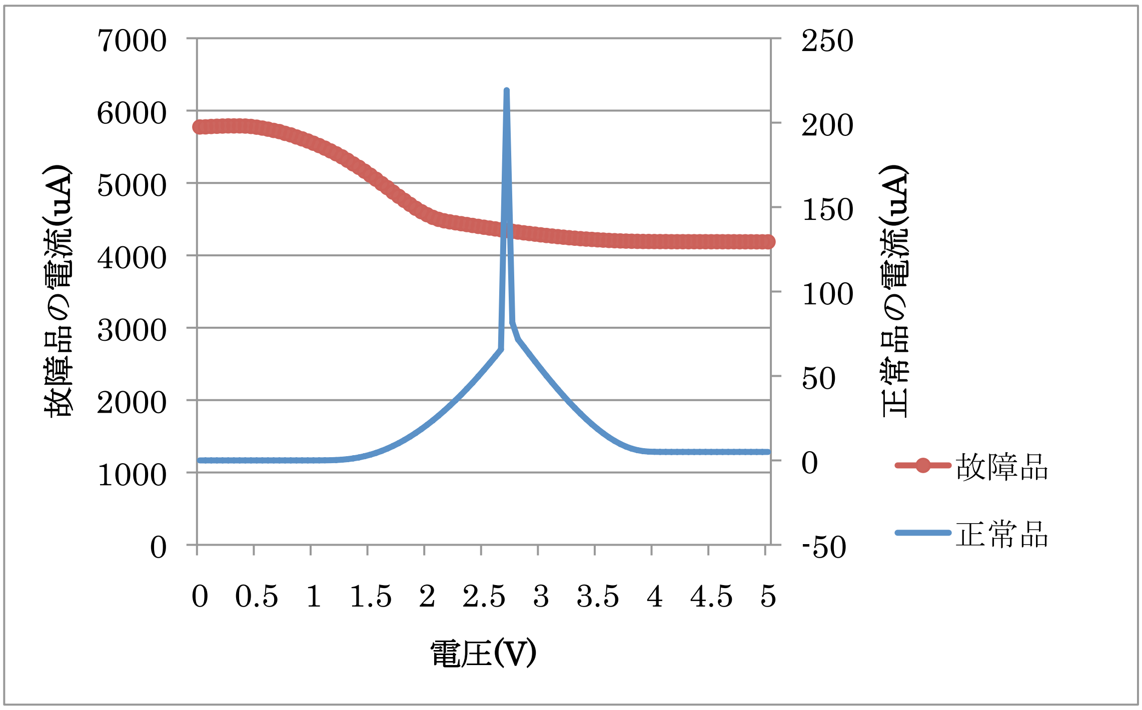


図 7.2.1：入力 00→10

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、６ピン配線の〇印の箇所に ESD 破壊を確認することができた。

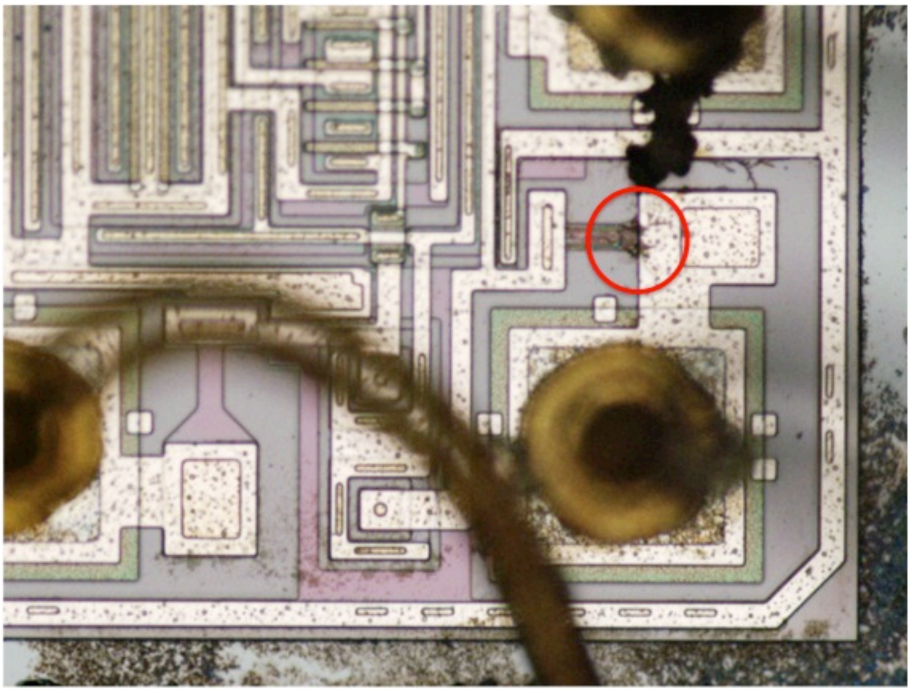


図 7.2.2：光学顕微鏡での故障箇所の特定

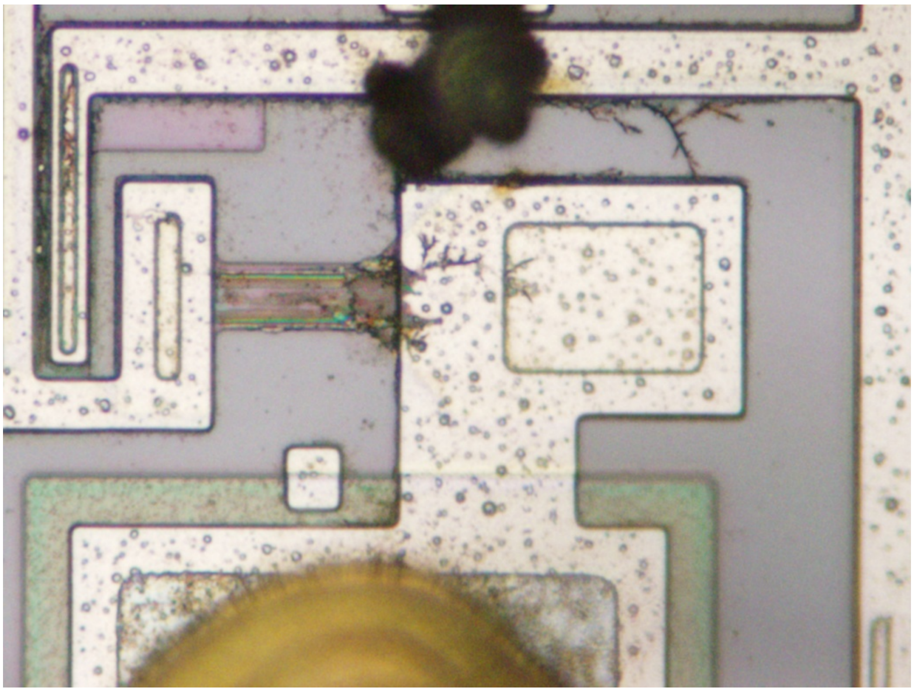


図 7.2.3：拡大した故障箇所

次に、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。光学顕微鏡で特定した破壊箇所の発光は無く他箇所の発光を確認することができた。

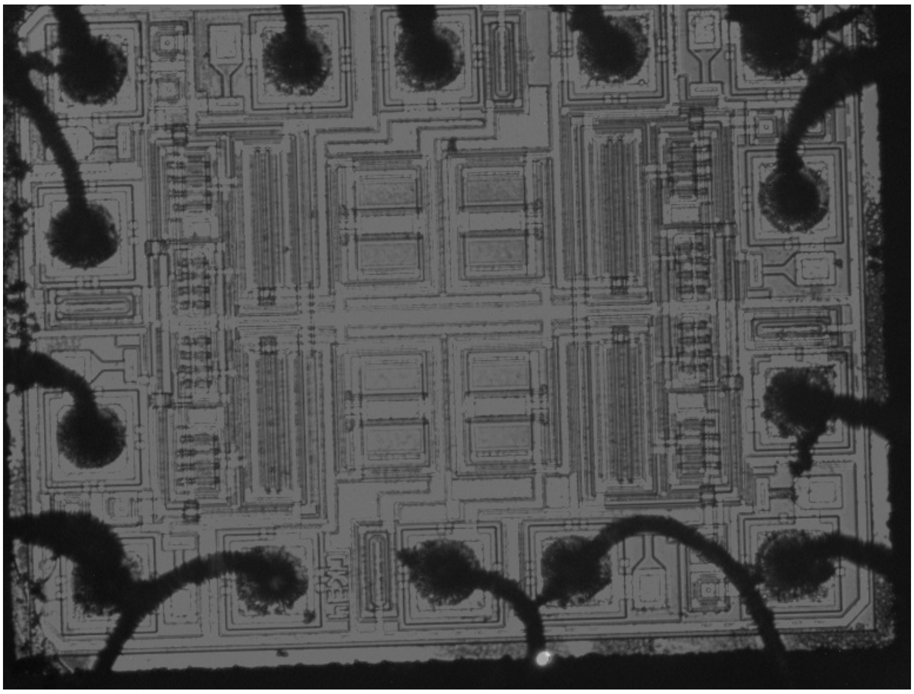


図 7.2.4：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

図 7.2.5 と図 7.2.6 は簡易エミッション顕微鏡で発光を確認した箇所を拡大し見比べたものである。しかし、発光箇所に ESD 故障のようなものは見られなかった。

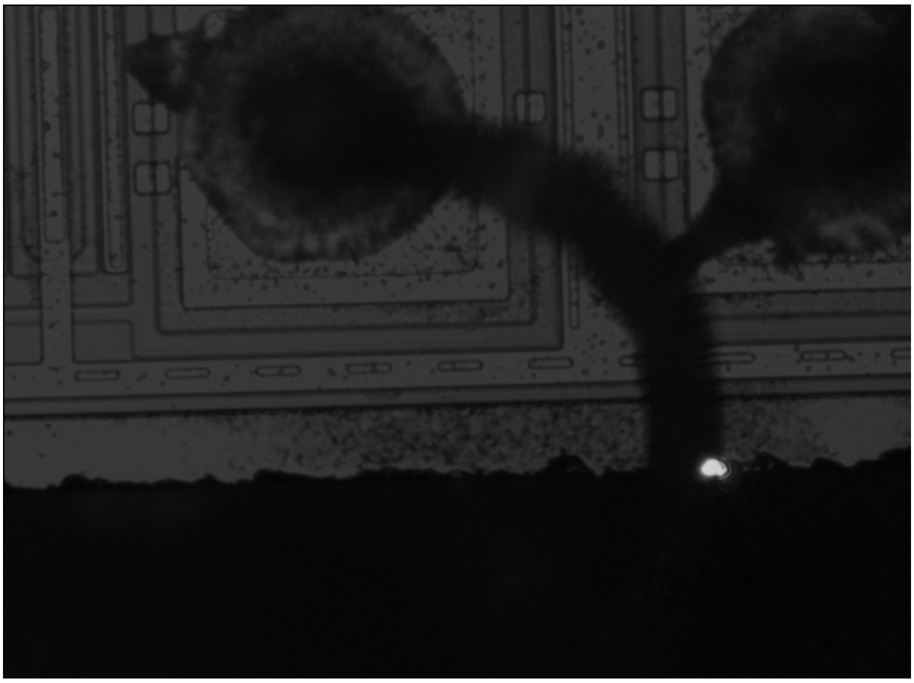


図 7.2.5：拡大した発光箇所

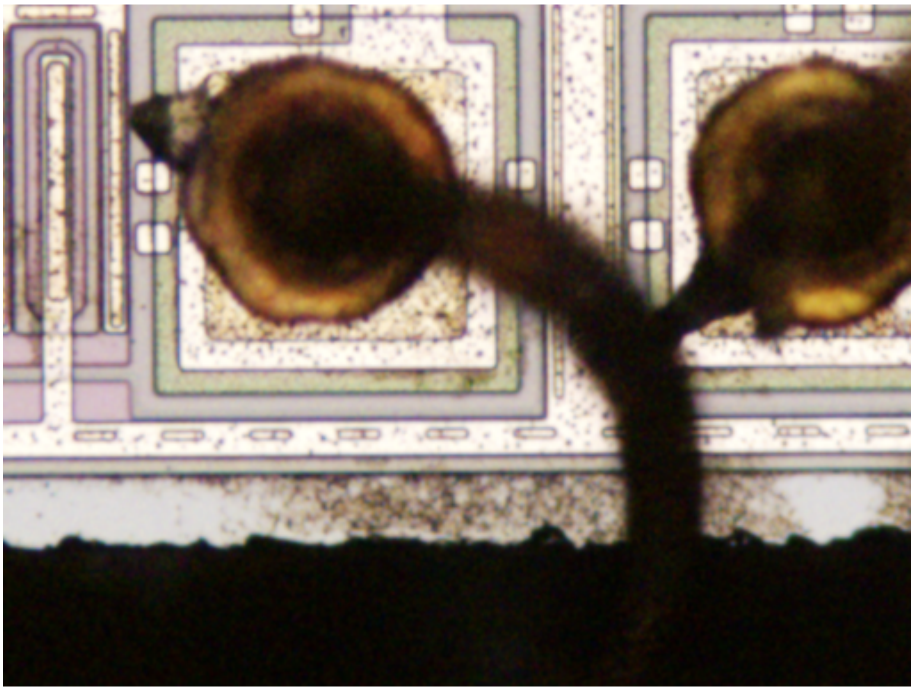


図 7.2.6：光学顕微鏡で見た発光箇所

光学顕微鏡で確認できた破壊箇所の近くにデンドライトのようなものが VDD 配線から６ピン配線に向けて伸びているのを確認することができた。そのため６ピン配線で確認出来た破壊はデンドライトによって VDD−６ピン配線間がショートし、発生したのではないかと考えられる。また、簡易エミッション顕微鏡によって確認出来た発光箇所は４ピンのボンディングワイヤーの一部分である。４ピンは ESD 破壊のみられる６ピンと入出力関係にあり、ESD による何らかの影響を受けたと思われるが、４ピンは 3000V 電圧印加時には接地されていないことから故障による発光ではなくパッケージ開封時に付着したゴミ等が発光している可能性も考えられる。

7.3　ESD 破壊サンプル３

ESD 破壊サンプル３で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル３	VDD→GND	3

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

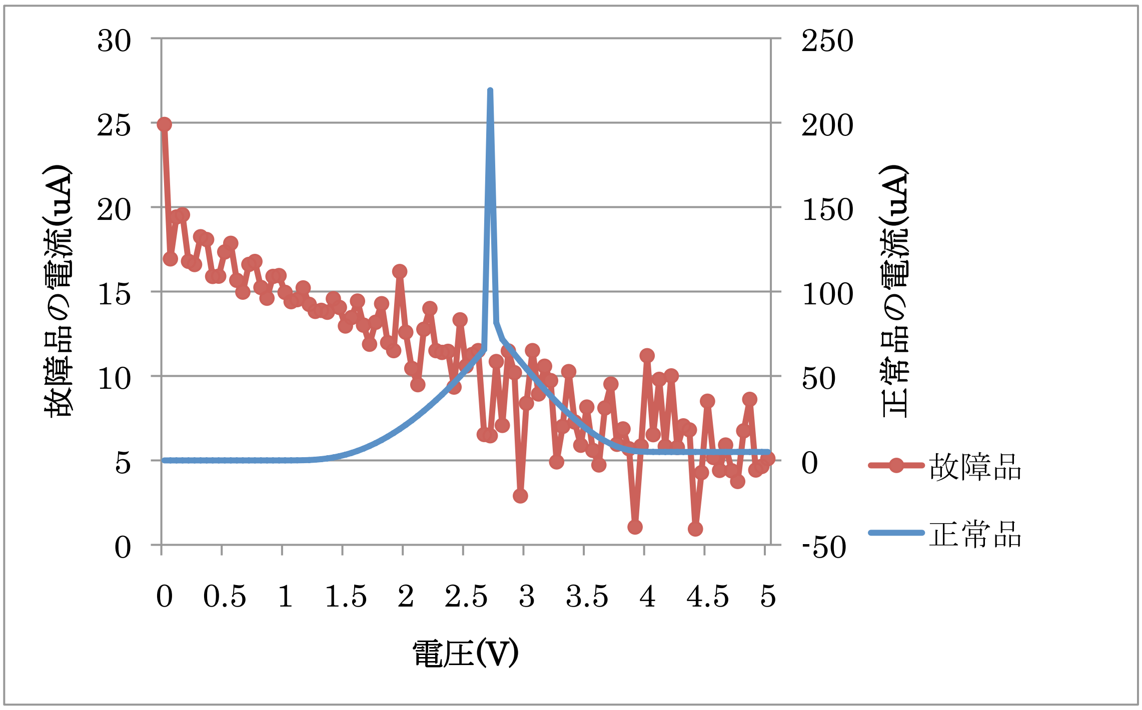


図 7.3.1：入力 00→10

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、VDD 配線と６ピン配線の間に ESD 破壊を確認することができた。

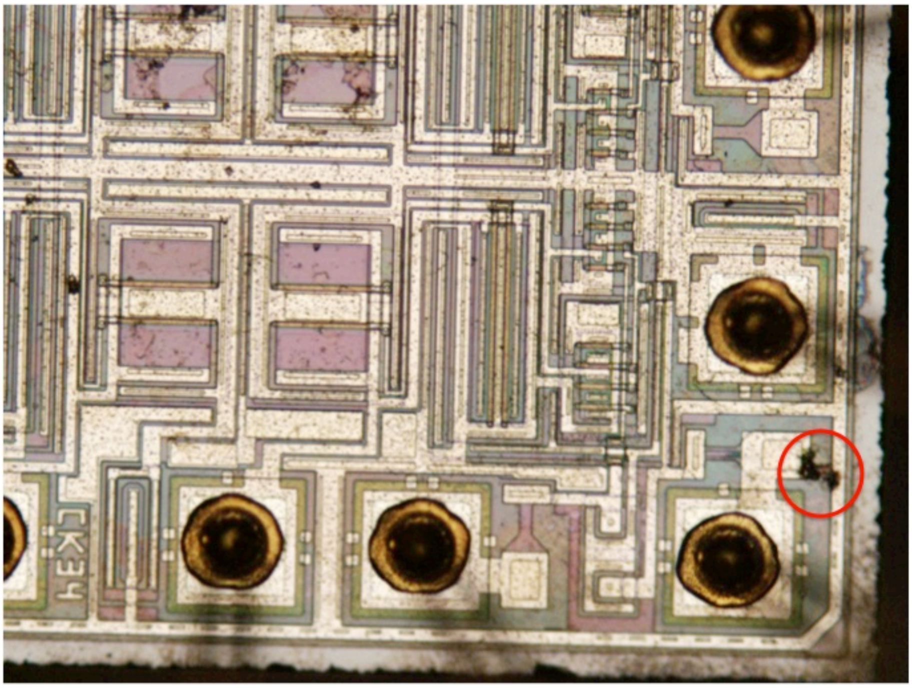


図 7.3.2：光学顕微鏡での故障箇所の特定

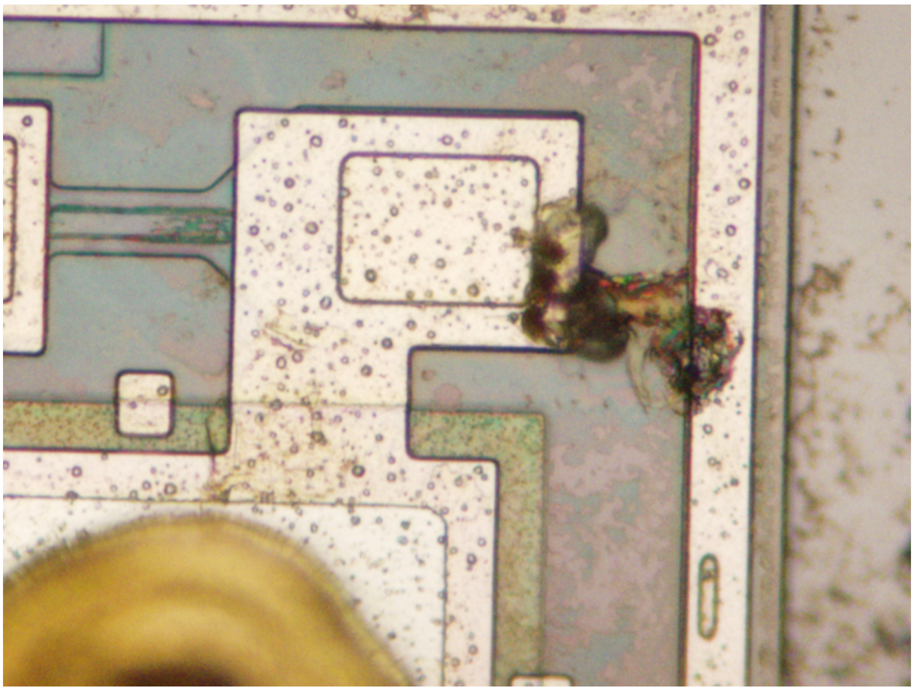


図 7.3.3：拡大した故障箇所

次に、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。光学顕微鏡で特定した箇所の発光を確認することができた。

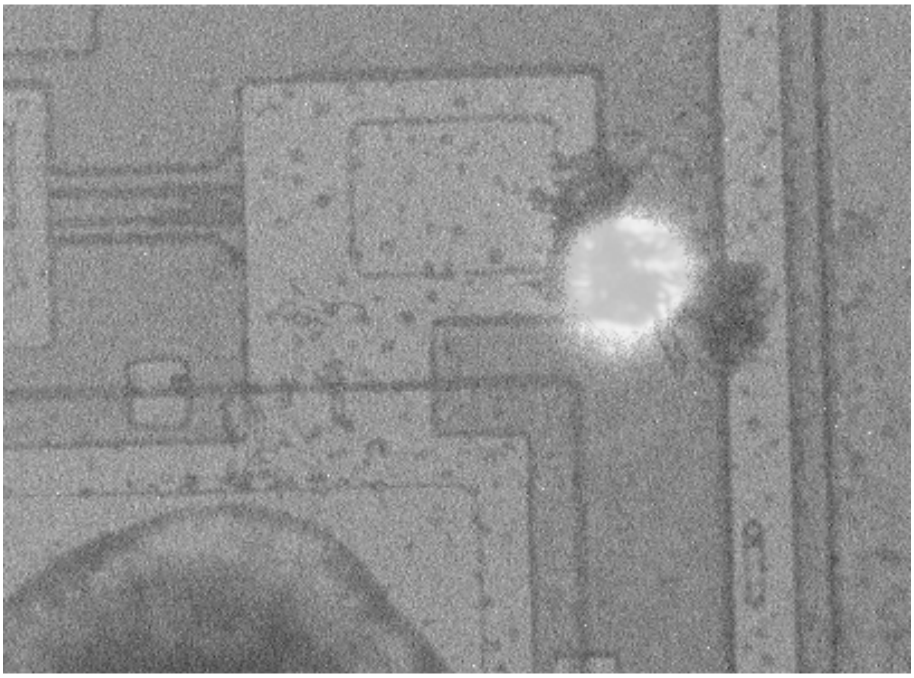


図 7.3.4：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

故障箇所は異なるが、このサンプルもサンプル２と同じく６ピン配線に ESD による故障箇所を確認することができた。また、確認出来た故障は VDD−６ピン間のショートであり、故障箇所が近いことから電圧印加した際にサンプル２と同じ経路で電流が流れたのではないかと考えられる。

7.4　ESD 破壊サンプル４

ESD 破壊サンプル４で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル４	VDD→IN(２ピン)	2

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

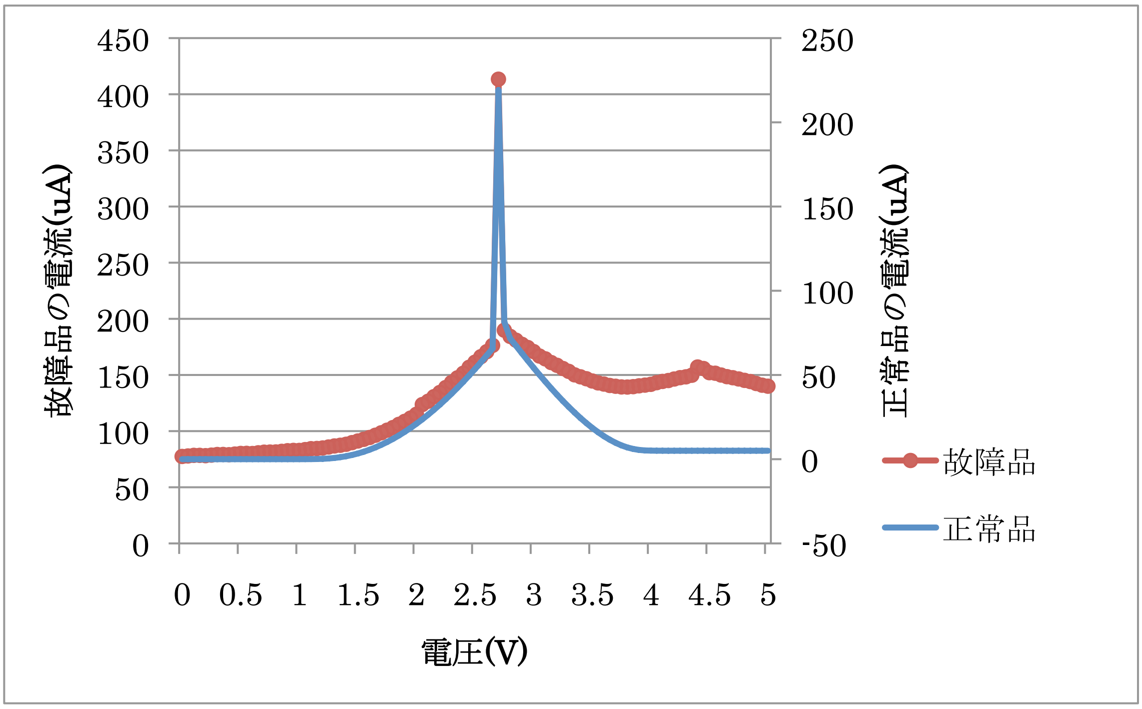


図 7.4.1：入力 00→10

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、光学顕微鏡では故障箇所の特定ができなかったため、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。

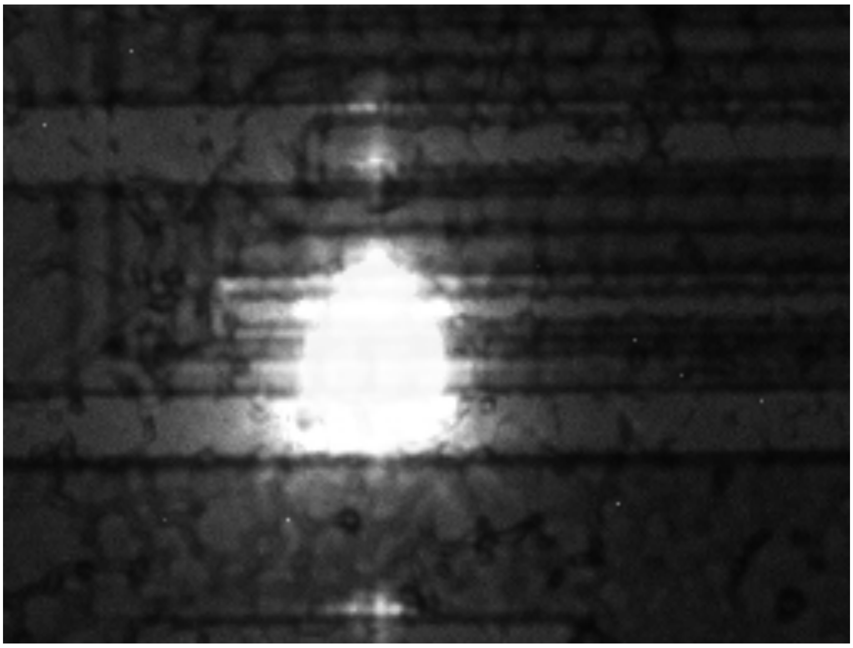


図 7.4.2：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

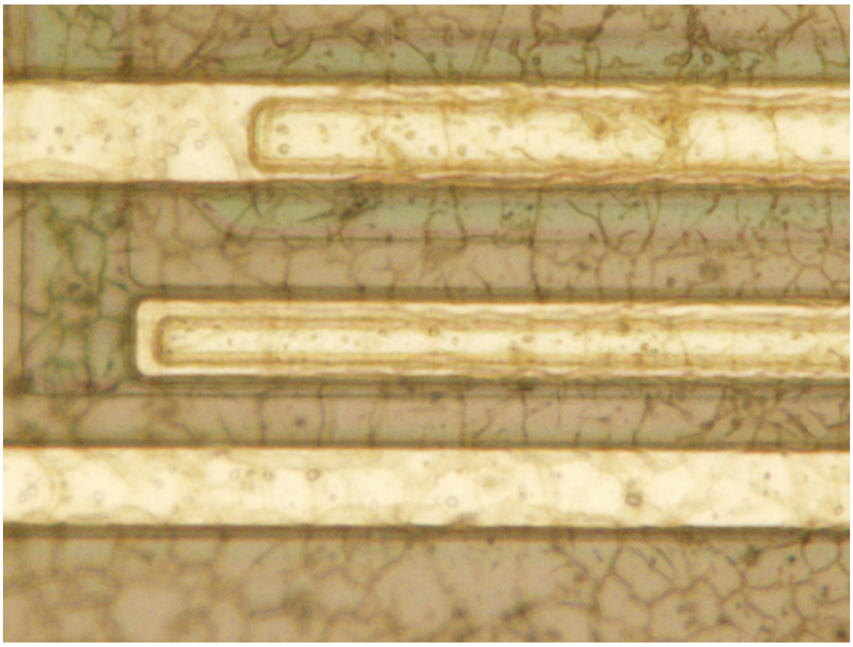


図 7.4.3：光学顕微鏡で見た発光箇所

簡易エミッション顕微鏡で確認できた発光箇所は VDD 配線と GND 配線の間であることから VDD–GND 配線間が故障したものと思われる。しかし、光学顕微鏡で発光箇所の確認をおこなったところ破壊跡のようなものは見られなかった。

7.5　ESD 破壊サンプル５

ESD 破壊サンプル５で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル５	VDD→IN(２ピン)	2

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

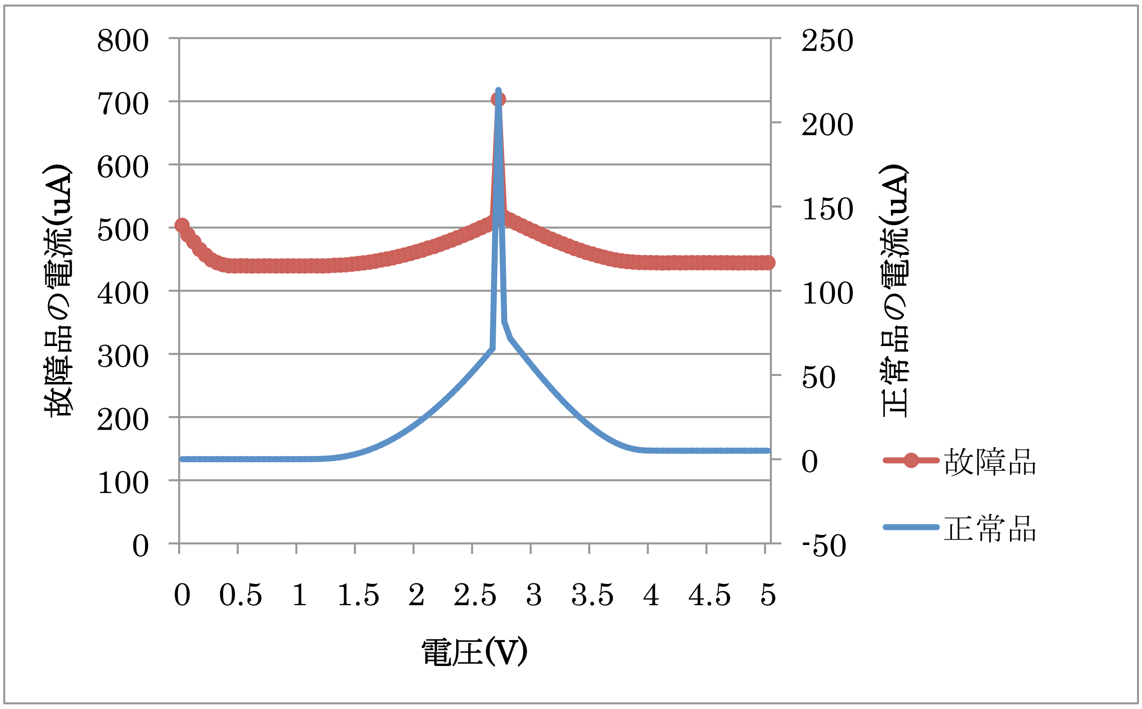


図 7.5.1：入力 00→10

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、サンプル４と同様に光学顕微鏡では故障箇所の特定ができなかったため、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。

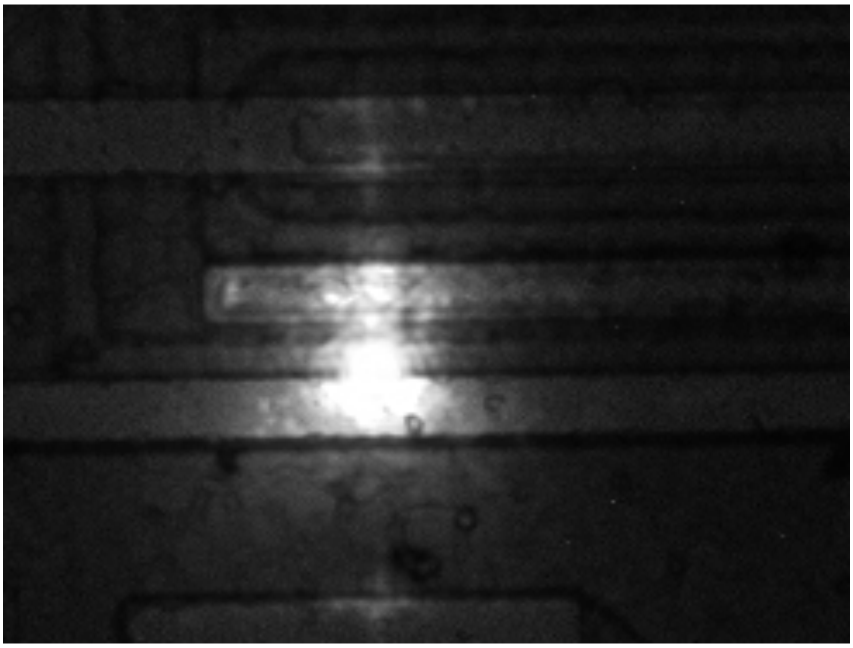


図 7.5.2：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

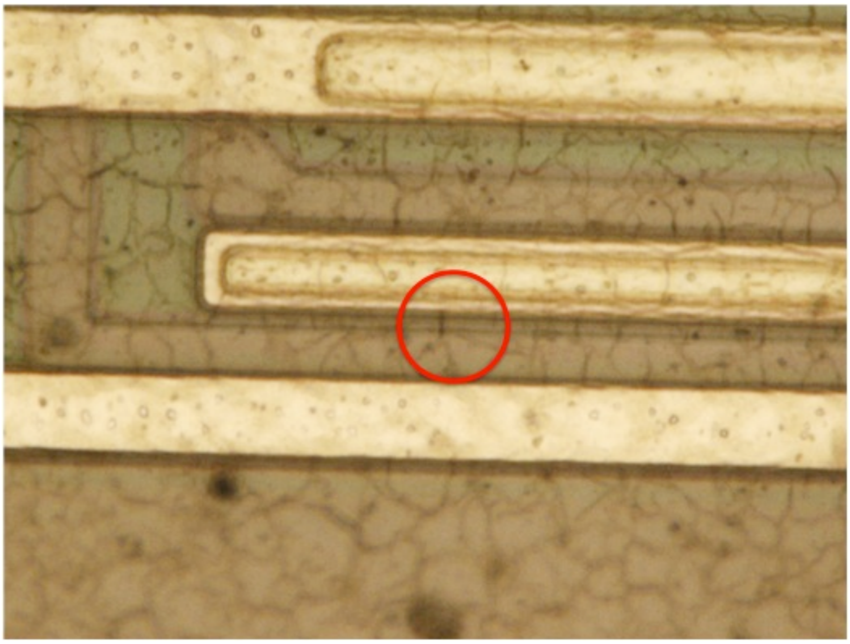


図 7.5.3：光学顕微鏡で見た発光箇所

簡易エミッション顕微鏡で確認できた発光箇所は VDD 配線と GND 配線の間であることからサンプル 4 と同じように VDD−GND 配線間が故障したものと思われる。また、光学顕微鏡で発光箇所の確認をおこなったところ、少しではあるが VDD−GND 配線間に亀裂のようなものを確認することが出来た。

7.6　ESD 破壊サンプル６

ESD 破壊サンプル６で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル６	VDD→IN(２ピン)	2

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

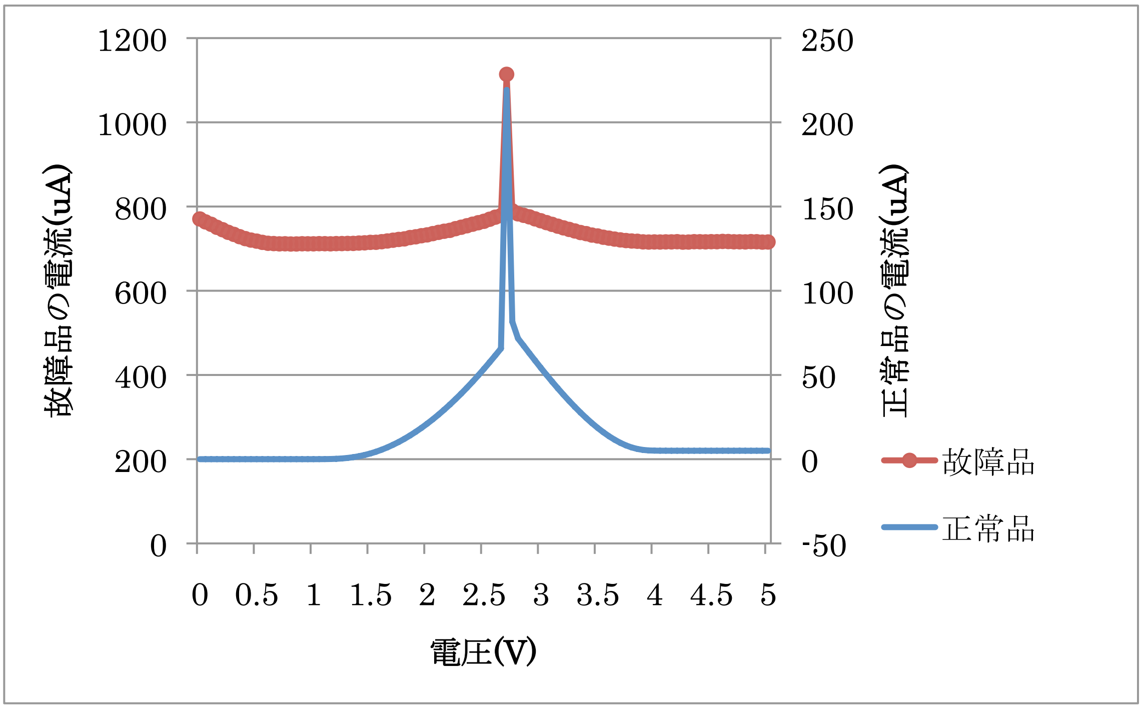


図 7.6.1：入力 00→10

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、サンプル４，５と同様に光学顕微鏡では故障箇所の特定ができなかったため、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。

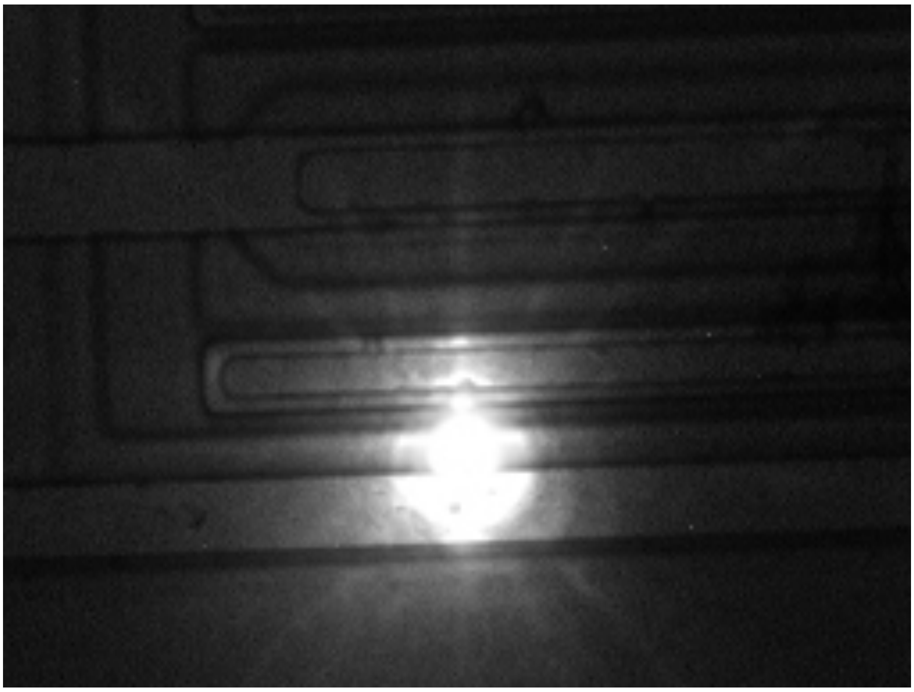


図 7.6.2：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

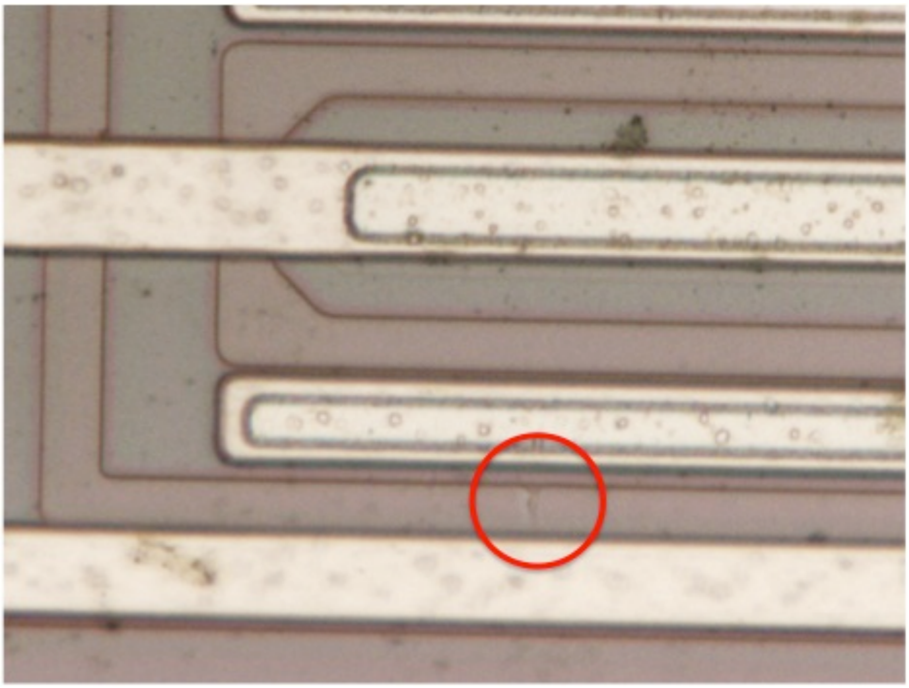


図 7.6.3：光学顕微鏡で見た発光箇所

簡易エミッション顕微鏡で確認できた発光箇所はVDD配線とGND配線の間であることからサンプル４、５と同じようにVDD−GND配線間が故障したものと思われる。また、光学顕微鏡で発光箇所の確認をおこなったところ、サンプル５と同じようにVDD−GND配線間に凹みのようなものを確認することができた。しかしこの亀裂はVDD−GND配線よりも下の層にあり、サンプル５とは亀裂の発生している層が異なっている。同じ電流経路を使用して破壊実験をおこなったサンプル４、５、６だが、どのサンプルでも同じ箇所が破壊されていることから３つとも同じ経路を電流が流れたものと考えられる。

7.7　ESD 破壊サンプル 7

ESD 破壊サンプル 7 で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル 7	IN(１ピン)→GND	2

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

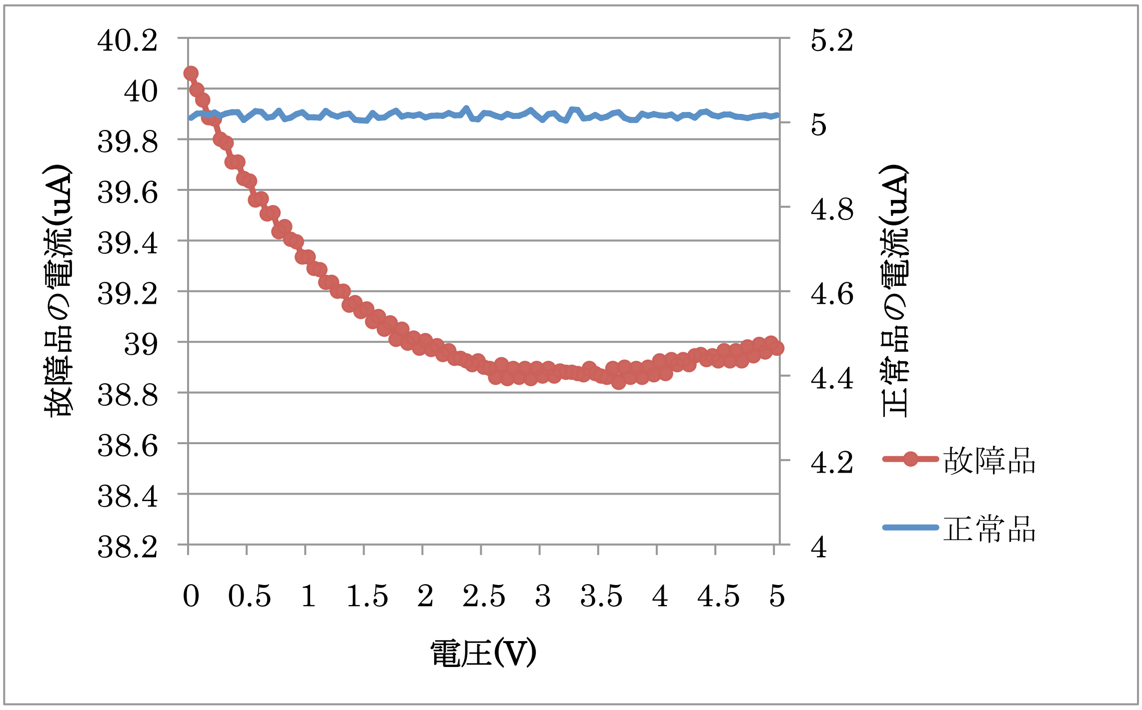


図 7.7.1：入力 10→11

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、光学顕微鏡では故障箇所の特定ができなかったため、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。

た。

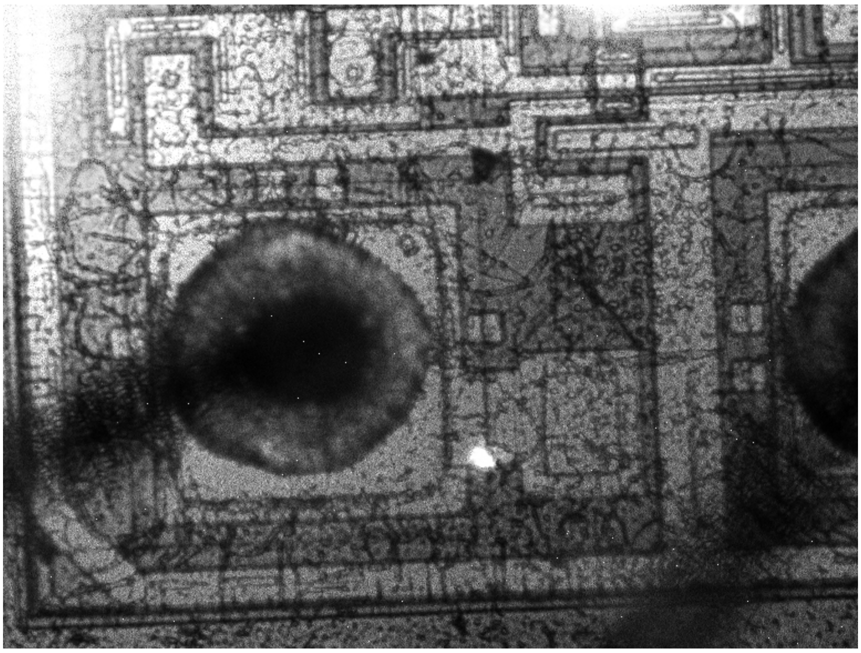


図 7.7.2：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

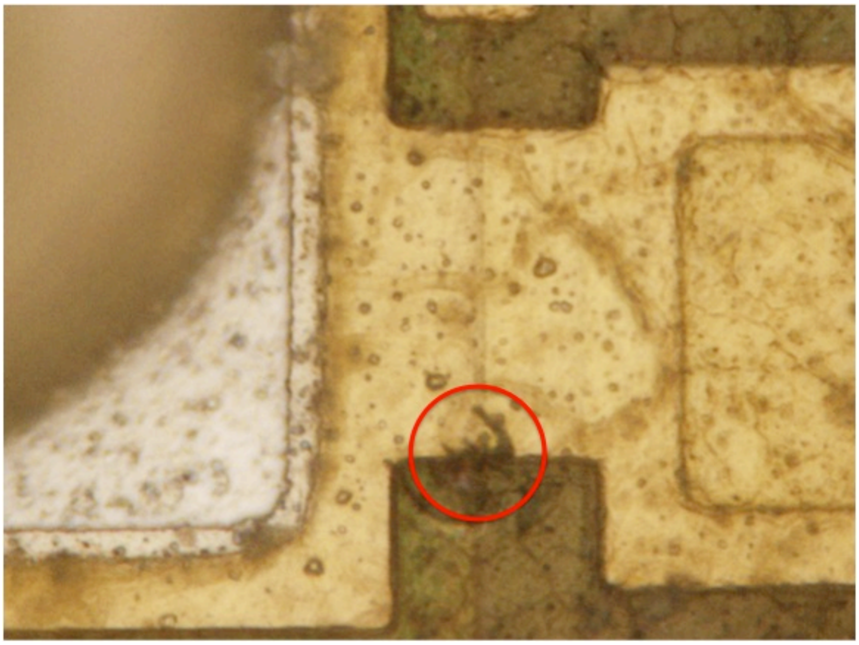


図 7.7.3：光学顕微鏡で見た発光箇所

簡易エミッション顕微鏡で確認できた発光箇所は２ピンの配線部分であることがわかった。以上より２ピン配線部分に ESD による故障を確認することができた。

7.8　ESD 破壊サンプル８

ESD 破壊サンプル８で使用した電流経路及び装置動作回数は以下のようになっている。

	電流経路	装置動作回数
ESD 破壊サンプル８	IN(１ピン)→GND	2

電圧 3000V を印加した後、半導体パラメータアナライザを使用し入力が変化した場合の電源電流を比較したものが以下の図である。

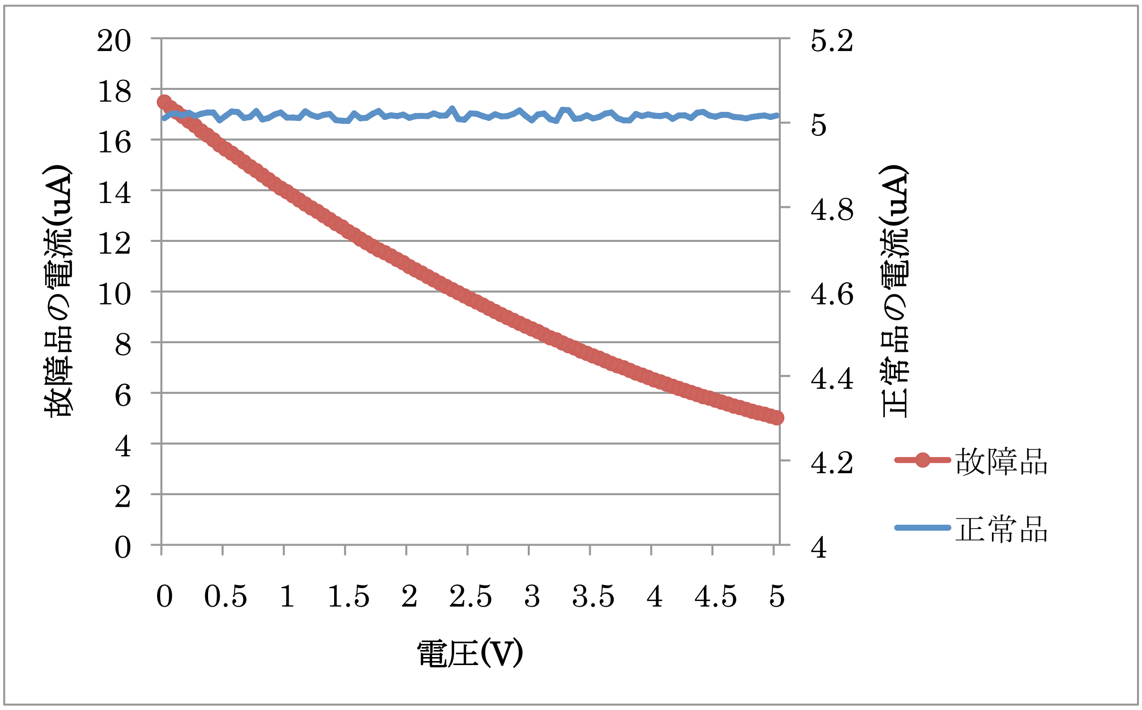


図 7.8.1：入力 10→11

故障確認後、パッケージの開封をおこない故障箇所の特定をおこなった。その結果、サンプル７と同じ箇所に ESD 破壊跡のようなものを確認することができた。

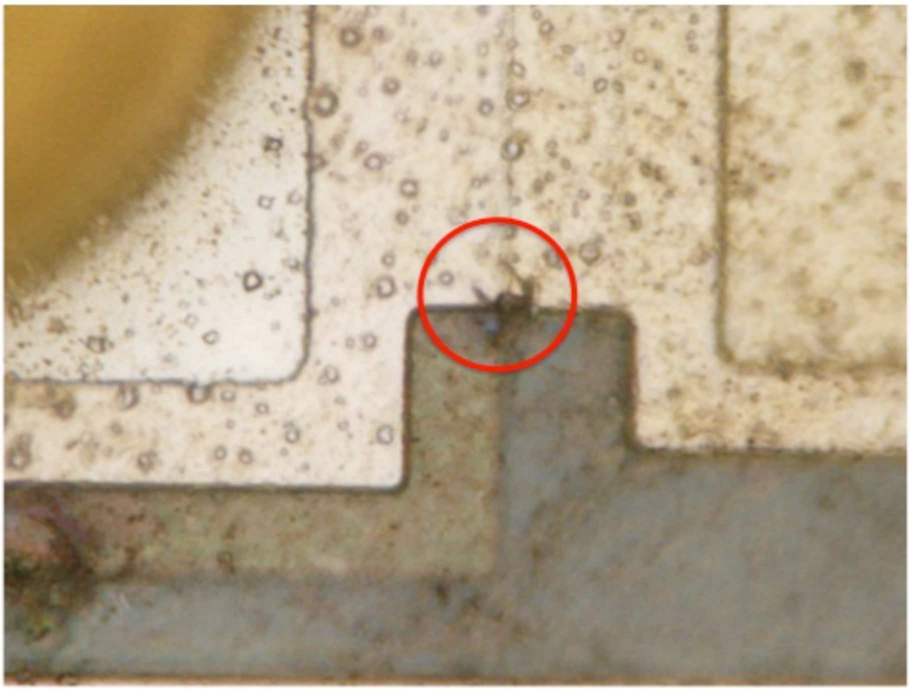


図 7.8.2：光学顕微鏡での故障箇所の特定

次に、簡易エミッション顕微鏡を使用した故障箇所の特定をおこなった。光学顕微鏡で特定した破壊箇所の発光は無く、他の箇所の発光を確認することができた。

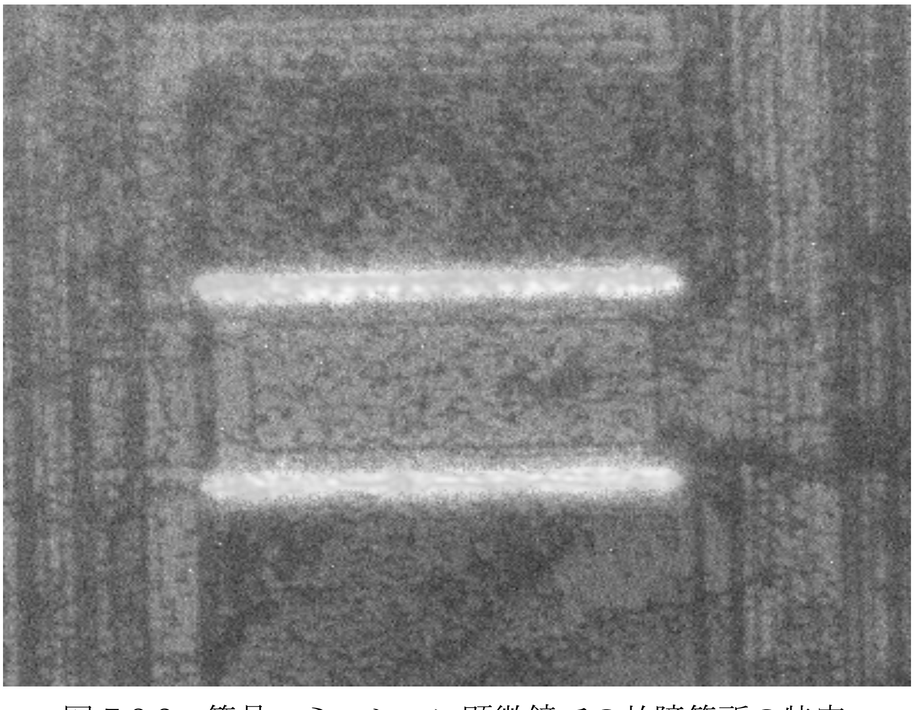


図 7.8.3：簡易エミッション顕微鏡での故障箇所の特定

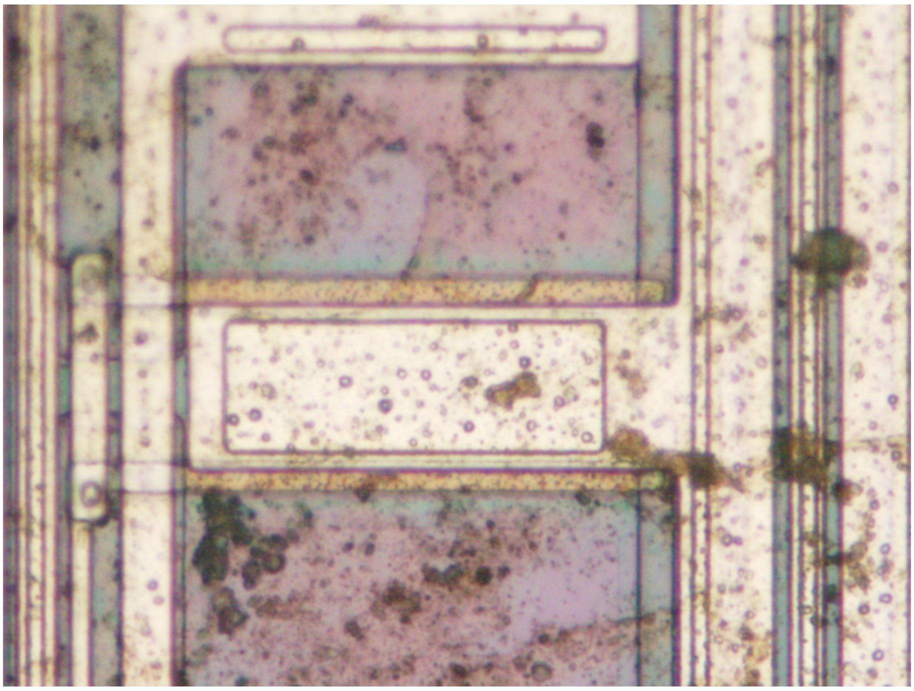


図 7.8.4：光学顕微鏡で見た発光箇所

簡易エミッション顕微鏡で確認出来た発光箇所は Nch ゲート部分であることがわかった。以上より 2 ピン配線部分と Nch ゲート部分に ESD による故障を確認することができた。

7.9　ESD 破壊試験装置の印加パルス・電圧測定

４カ所でおこなった測定の結果は以下のようになった。

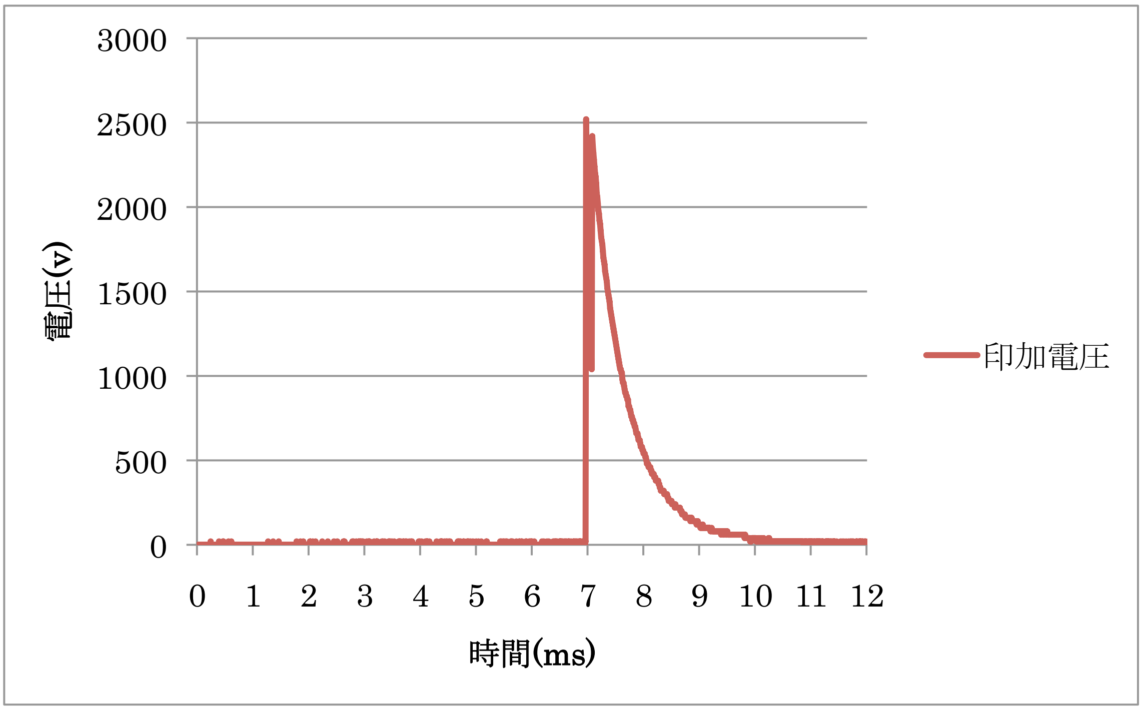


図 7.9.1：モニター端子(1)

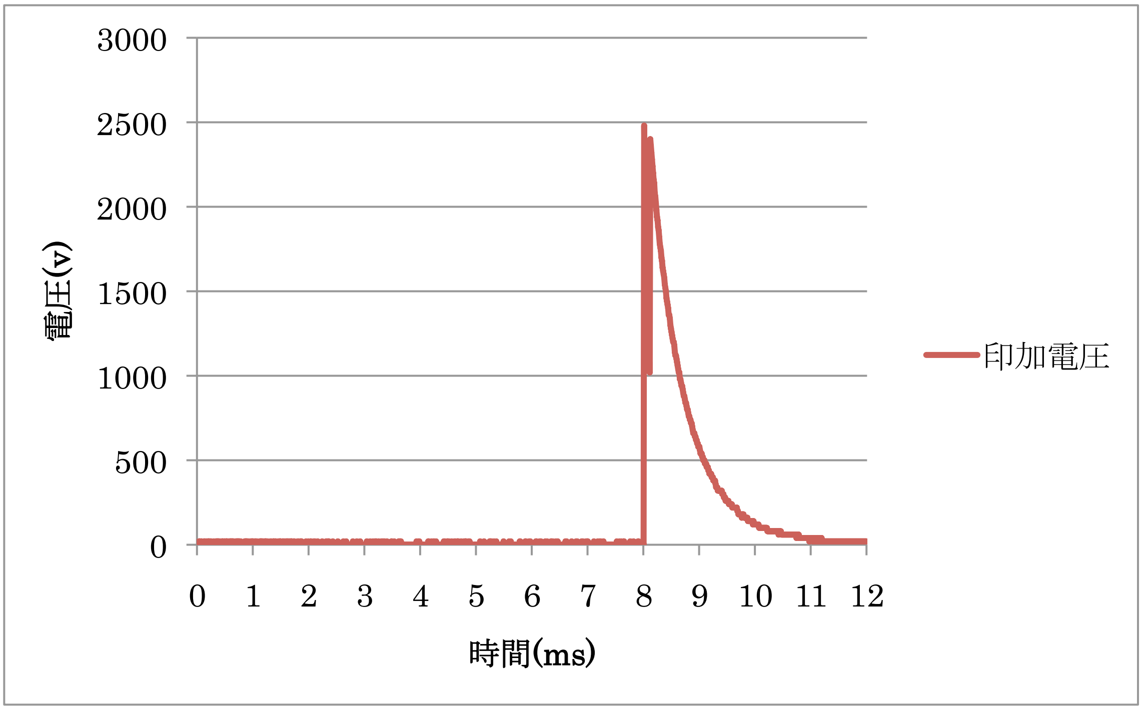


図 7.9.2：OUT 端子(1)

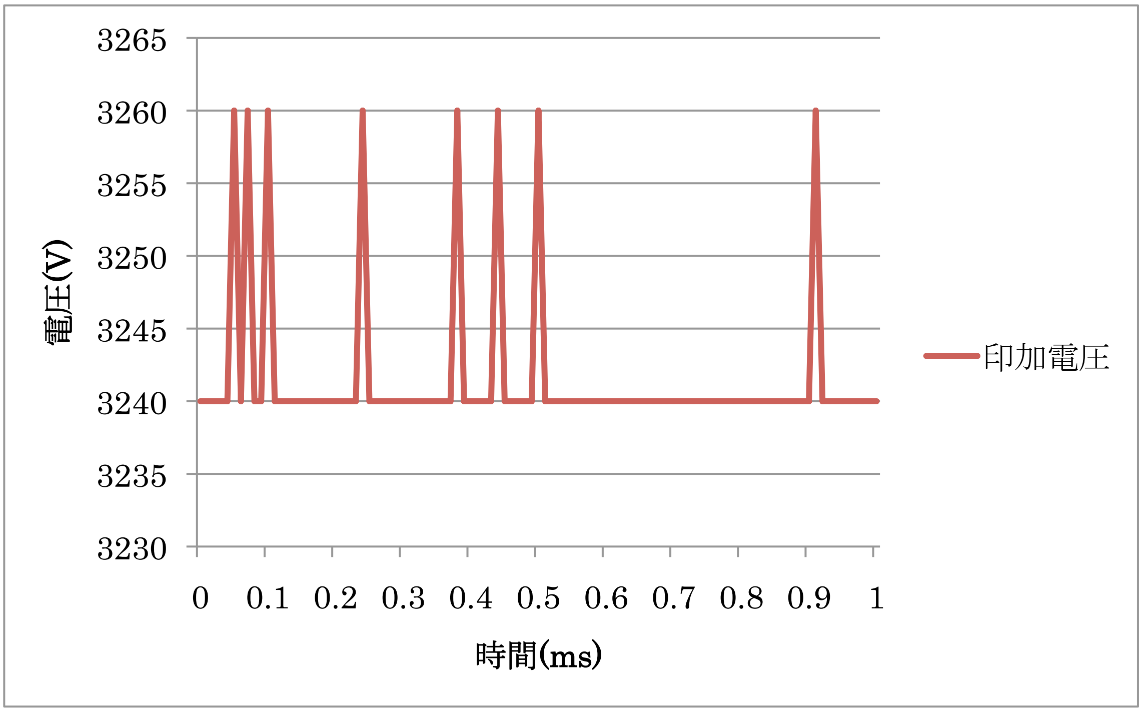


図 7.9.3：M/N 端子

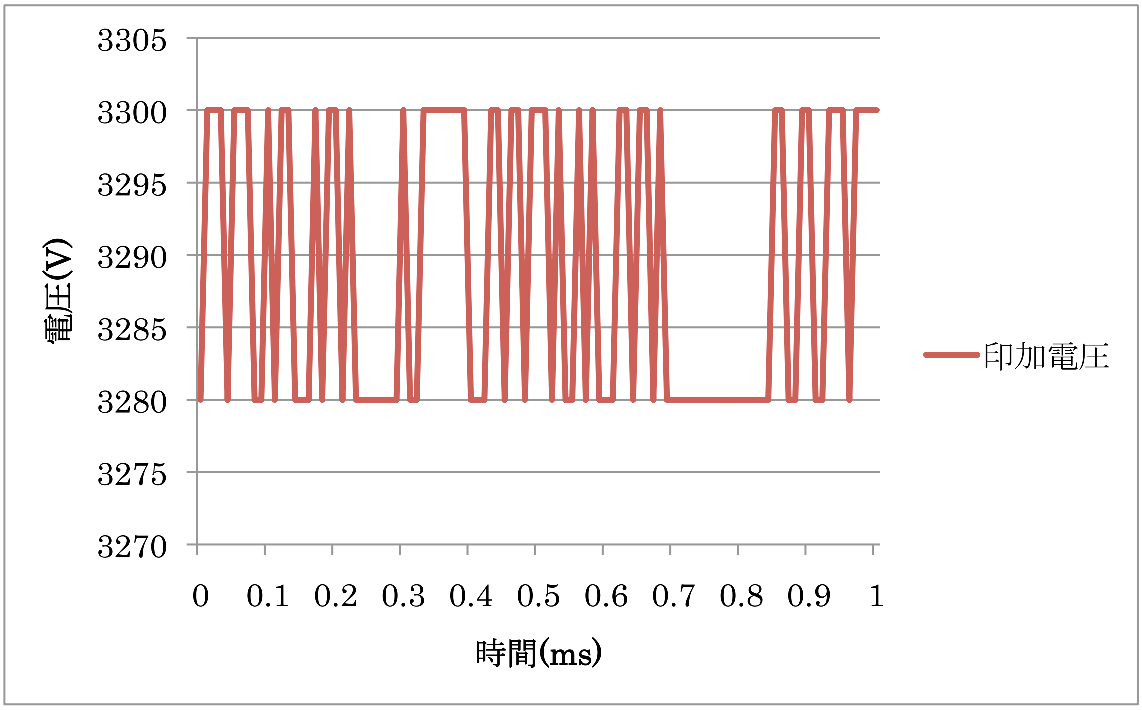


図 7.9.4 L/N 端子

上記の測定結果より、ESD 破壊試験装置から LSI に印加される電圧値がモニター･OUT 端子ともにこの装置の仕様である 3000[V]に至らないことがわかった。また、取扱説明書において正確な印加電圧 3000[V]の確認場所として M/N 端子において確認することが明記されているが、M/N・L/N 端子区間においては 3000[V]を超える電圧値が確認できた。

測定箇所	モニター端子	OUT 端子	M/N 端子	L/N 端子
最大測定電圧	2520[V]	2480[V]	3260[V]	3300[V]

実験結果より L/N 端子の電圧 $V_{L/N}$=3300[V]だった場合の OUT 端子の電圧 V_{out} を求める。電圧計のある経路には測定時以外は配線がおこなわれていないため、図 6.5.1 の回路を図 7.9.5 の回路のように簡略化して考える。また､周期は図 3.2.3 のタイミング図より T=300[ms]とする。

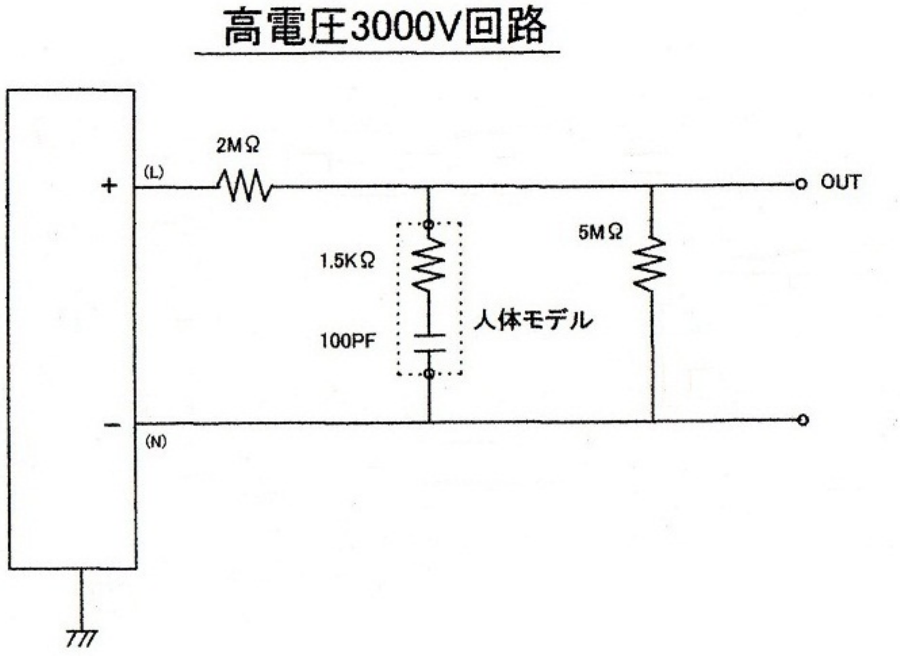


図 7.9.5：高電圧回路簡略図

周波数 f は

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{300 \times 10^{-3}} = 3.33[\text{Hz}]$$

コンデンサ C のリアクタンス X_C は、

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 3.33 \times 100 \times 10^{-12}} = 4.78 \times 10^{8}[\Omega]$$

人体モデル部分の合成抵抗 Z_1 は、

$$Z_1 = \sqrt{(1.5 \times 10^{3})^2 + (4.78 \times 10^{8})^2} = 4.78 \times 10^{8}[\Omega]$$

回路全体の合成抵抗 Z_0 は、

$$Z_0 = 2 \times 10^{6} + \frac{5 \times 10^{6} \times 4.78 \times 10^{8}}{5 \times 10^{6} + 4.78 \times 10^{8}} = 6.95 \times 10^{6} = 6.95[\text{M}\Omega]$$

回路全体に流れる電流 I は、

$$I = \frac{3300}{6.95 \times 10^{6}} = 4.75 \times 10^{-4}[\text{A}]$$

以上より V_{out} は、

$$V_{out} = 3300 - \left(2 \times 10^{6} \times 4.75 \times 10^{-4}\right) = 2.35 \times 10^{3} = 2350[\text{V}]$$

また、V_{out}=3000V だった場合の L/N 端子の電圧 $V_{L/N}$ を求める。

周波数 f は

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{300 \times 10^{-3}} = 3.33[\text{Hz}]$$

コンデンサ C のリアクタンス X_C は、

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 3.33 \times 100 \times 10^{-12}} = 4.78 \times 10^{8}[\Omega]$$

人体モデル部分の合成抵抗Z_1は、

$$Z_1 = \sqrt{(1.5\times10^3)^2 + (4.78\times10^8)^2} = 4.78\times10^8[\Omega]$$

人体モデル部分に流れる電流I_2は、

$$I_2 = \frac{3000}{4.78\times10^8} = 6.28\times10^{-6}[A]$$

5[MΩ]に流れる電流I_3は、

$$I_3 = \frac{3000}{5\times10^6} = 6\times10^{-4}[A]$$

回路全体に流れる電流I_1は、

$$I_1 = I_2 + I_3 = 6.0628\times10^{-4}[A]$$

2[MΩ]にかかる電圧$V_{L/N-out}$は、

$$V_{L/N-out} = 2\times10^6\times6.0628\times10^{-4} = 1212.56[V]$$

以上より L/N 端子にかかる電圧$V_{L/N}$は、

$$V_{L/N} = V_{L/N-out} + V_{out} = 1212.56 + 3000 = 4212.56[V]$$

以上の結果と測定結果をグラフにまとめると以下のようになる。

	実測結果	$V_{L/N}$=3300V の場合	V_{out}=3000V の場合
L/N 端子にかかる電圧	3300[V]	3300[V]	4212.56[V]
OUT 端子にかかる電圧	2480[V]	2350[V]	3000[V]

測定結果と計算結果を比較すると L/N 端子にかかる電圧が同じ場合には OUT 端子にかかる電圧は比較的近い値になることがわかった。実測値と計算値で 130[V]の差はあるが、それはリレーや配線による抵抗を考慮していないためだと考えられる。また、OUT 端子にかかる電圧を 3000[V]にしたい場合には L/N 端子にかかる電圧が約 4213[V]必要になるという計算結果が出た。そのため、入力電圧(L/N 端子にかかる電圧)を変化させること無く出力電圧を 3000[V]にす

るためには図 7.9.5 の回路図における抵抗 2[MΩ]の抵抗値を変えることが必要だと考えた。

周波数 f は

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{300 \times 10^{-3}} = 3.33[\mathrm{Hz}]$$

コンデンサ C のリアクタンス X_C は、

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 3.33 \times 100 \times 10^{-12}} = 4.78 \times 10^{8}[\Omega]$$

人体モデル部分の合成抵抗 Z_1 は、

$$Z_1 = \sqrt{(1.5 \times 10^{3})^2 + (4.78 \times 10^{8})^2} = 4.78 \times 10^{8}[\Omega]$$

人体モデル部分に流れる電流 I_2 は、

$$I_2 = \frac{3000}{4.78 \times 10^{8}} = 6.28 \times 10^{-6}[\mathrm{A}]$$

5[MΩ]に流れる電流 I_3 は、

$$I_3 = \frac{3000}{5 \times 10^{6}} = 6 \times 10^{-4}[\mathrm{A}]$$

回路全体に流れる電流 I_1 は、

$$I_1 = I_2 + I_3 = 6.0628 \times 10^{-4}[\mathrm{A}]$$

以上より抵抗 R は、

$$R = \frac{(V_{L/N} - V_{out})}{I_1} = \frac{(3300 - 3000)}{6.0628 \times 10^{-4}} = 4.95 \times 10^{5} = 495[\mathrm{k\Omega}]$$

以上の結果より、2[MΩ]の抵抗を約 495[kΩ]の抵抗に変更することで入力電圧を変化させることなく印加電圧を 3000[V]にすることが可能であると考えられる。

以上の結果より、実際に 2[MΩ]の抵抗を 500[kΩ]に変更した場合の OUT 端子(印加電圧)並びにモニター端子の電圧測定をおこなった。変更する抵抗として 495[kΩ]の抵抗を用意するのは難しいため図 7.9.6 のように 500[kΩ]の抵抗に変更して測定をおこなった。

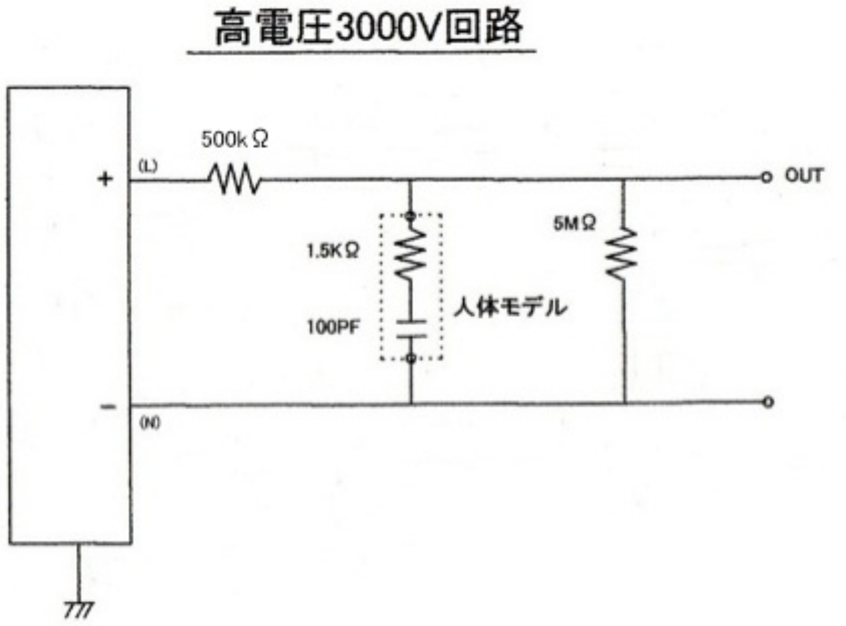


図 7.9.6：高電圧回路図 2

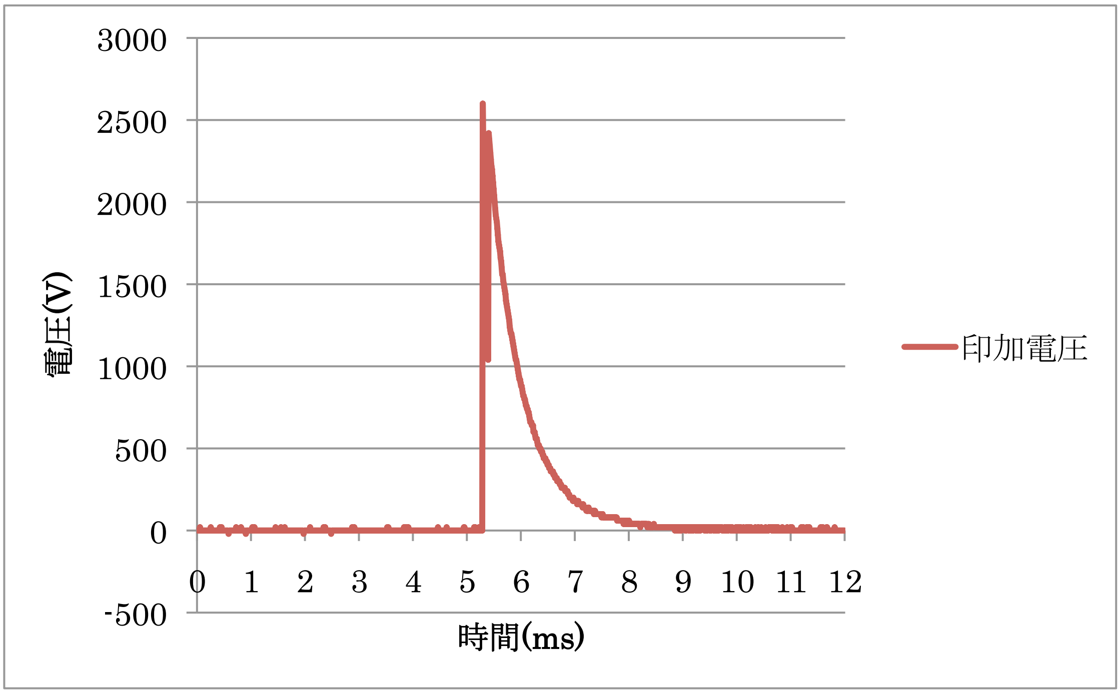


図 7.9.7：モニター端子(2)

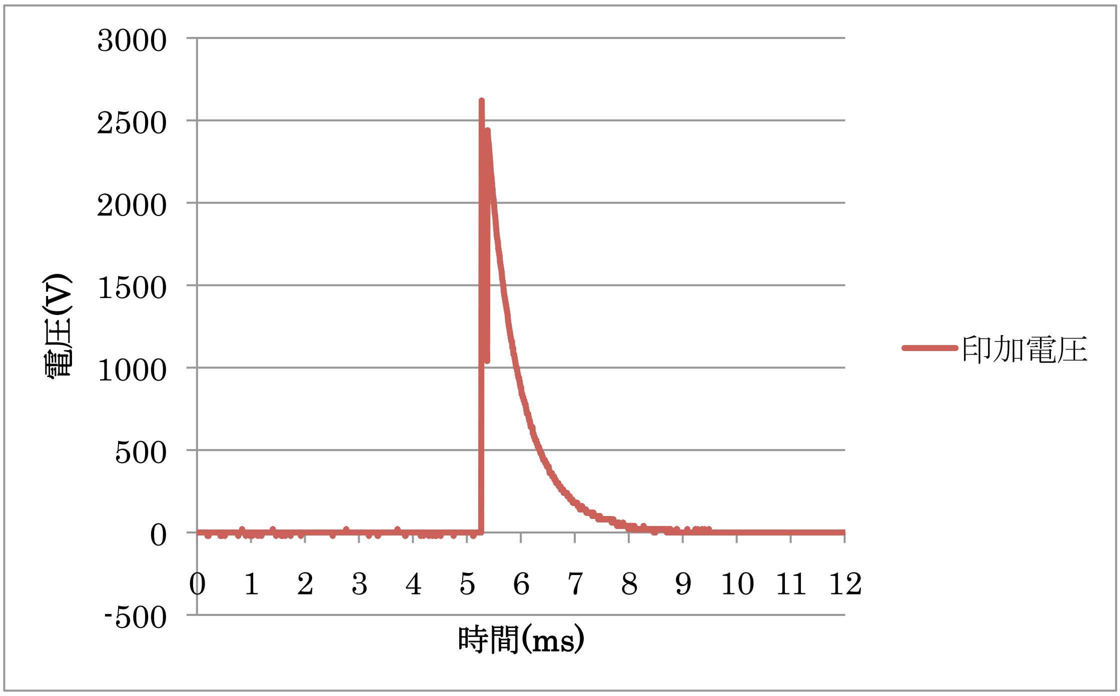


図 7.9.8：OUT 端子(2)

抵抗値の変化前／後の測定結果をまとめたものが以下のグラフである。変化前／後で電圧を比較すると OUT 端子で 140[V]の電圧増加を確認することができた。しかし、上記でおこなった計算より期待した結果をえることはできなかった。

	抵抗：2[MΩ]	抵抗：500[kΩ]
モニター端子にかかる最大電圧	2520[V]	2600[V]
OUT 端子にかかる最大電圧	2480[V]	2620[V]

第８章　考察・結論

この章では本研究の考察、結論について述べる。

考察

本研究の目的であるESD破壊試験装置の課題点の発見として印加電圧の問題を発見した。装置の仕様としてMAX3000Vを印加電圧として出力する必要があるが、実際には3000Vに届かない電圧値が出力されていた。この問題の解決策として人体帯電モデルと直列に接続されている抵抗の値を変更することで人体帯電モデルと抵抗の分圧比を変え人体帯電モデルにかかる電圧を増やすということを考えた。そこで実際に抵抗値を変更して計測をおこなったのだが、期待したどおりの成果をえることはできなかった。考えられる原因として抵抗の接続方法がある。変更前後では部品の問題より抵抗の接続方法が異なっていることから端子間の接続がうまくいっておらず、変更した抵抗値以上の抵抗がかかっているのではないかと考えられる。そのため部品調達後、変更前と同じ接続方法で抵抗を接続し再度測定をおこなおうと考えている。また、今回測定をおこなった装置の印加電圧については仕様としての電圧MAX値3000Vにはいたらなかったものの、人体帯電モデルの印加電圧幅は2kV~5kVであるため人体帯電モデルのシミュレートとしては問題のない電圧値といえる。

ESD破壊は電流経路によって故障箇所は変化するが、故障の発生する部位は電流経路ごとに決まってくるという結果が出た。その中で簡易エミッション顕微鏡を使用した発光観測をおこなった際に発光する故障箇所と発光しない故障箇所があった。その理由として考えられるのは簡易エミッション顕微鏡に使用しているCCDカメラの波長帯域幅の問題である。CCDカメラで見ることのできる波長帯域外の光は発光としてカメラに捉えることができないため今回発光を確認出来なかった故障箇所以外の故障も考えられる。

結論

本研究をおこなうことでESD破壊試験装置の課題点を発見した。課題点としてICへの印加電圧の問題があり、今回の研究でこの課題点への解決策として抵抗値の変更をおこなうことを考えたが問題の解決にはいたらなかった。今後の研究では今回発見した問題の解決とともに、装置の改良をおこなっていくつもりである。

謝辞

本研究をおこなうにあたりご指導を賜った真田克教授に深く感謝を申し上げます。また、共に研究しあった真田研究室の皆様に深く感謝を申し上げます。

参考文献

[1]今井康雄,田中大起, 「電子部品の故障解析および良品解析－車載用電子部品の信頼性向上のための取り組み－」, 信学技報　R2007-29～36, Vol. 107, No. 213, pp.35-39

[2]山崎規雄, 「ESD破壊試験装置取り扱い説明書」

[3]山崎規雄, 「ESD破壊試験装置の開発と評価」高知工科大学[2009]

[4]小松邦敏, 「静電気破壊とESDモデルの対比研究」高知工科大学[2010]

[5]有田竜一, 「冷却CCDを用いた発光・発熱の検出」高知工科大学[2007]

[6]株式会社キーエンス　URL http://www.keyence.co.jp/seidenki/

PDFファイル「静電気ハンドブック」,「静電破壊」,「帯電のメカニズム～個体の帯電～編」